



**UM ESTUDO EXPERIMENTAL SOBRE A INFLUÊNCIA DA
TEMPERATURA NO COMPORTAMENTO DA RESISTÊNCIA À
FADIGA DE CABOS CONDUTORES DE ENERGIA
FABRICADOS COM A LIGA AL 1350**

ELIZETE ROCHA DA COSTA

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

BRASÍLIA 2022

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA – FT
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA – ENM**

**UM ESTUDO EXPERIMENTAL SOBRE A INFLUÊNCIA DA
TEMPERATURA NO COMPORTAMENTO DA RESISTENCIA
À FADIGA DE CABOS CONDUTORES DE ENERGIA
FABRICADOS COM A LIGA AL 1350**

ELIZETE ROCHA DA COSTA

ORIENTADOR: JORGE LUIZ DE ALMEIDA FERREIRA, Dr

TESE DE DOUTORADO EM CIÊNCIAS MECÂNICAS

BRASÍLIA 2022

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**UM ESTUDO EXPERIMENTAL SOBRE A INFLUÊNCIA DA
TEMPERATURA NO COMPORTAMENTO DA RESISTENCIA
À FADIGA DE CABOS CONDUTORES DE ENERGIA
FABRICADOS COM A LIGA AL 1350**

ELIZETE ROCHA DA COSTA

**TESE SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA
MECÂNICA DA FACULDADE DE TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE
DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA
A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR EM CIÊNCIAS MECÂNICAS.**

APROVADA POR:

Prof. Jorge Luiz de Almeida Ferreira, Dr., ENM – UnB (Orientador)

**Prof., Waldek Wladimir Bose Filho Dr., EESC – USP (Examinador
Externo)**

**Prof., Raimundo Carlos Silvério Freire Júnior Dr., DEM–CT/UFRN
(Examinador Externo)**

**Prof., Eder Lima de Albuquerque Dr. , ENM – UnB (Examinador
Interno)**

BRASÍLIA/DF, 2022

FICHA CATALOGRÁFICA

COSTA, ELIZETE ROCHA DA

Um Estudo Experimental Sobre a Influência da Temperatura no Comportamento da Resistência à Fadiga de Cabos Condutores de Energia Fabricados Com a Liga Al 1350. [Distrito Federal] 2022.

xiv, 212 págs., 210 x 297 mm (ENM/FT/UnB, Doutor, Ciências Mecânicas, 2022).

Tese de Doutorado – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Mecânica.

1. Fadiga em alta temperatura 2. Condutores aéreos 3. Controlador PID

4. Orchid

I. ENM/FT/UnB

II. ENM.TD 227/2022

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

COSTA, E. R (2022). Um Estudo Experimental Sobre a Influência da Temperatura no Comportamento de resistência à Fadiga de Cabos Condutores de Energia Fabricados Com a Liga Al 1350. Tese de Doutorado em Ciências Mecânicas, Publicação ENM – TD 212/2022.

Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 212 p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTORA: Elizete Rocha da Costa.

TÍTULO: Um Estudo Experimental Sobre a Influência da Temperatura no Comportamento da resistência à Fadiga de Cabos Condutores de Energia Fabricados Com a Liga Al 1350.

GRAU: Doutor

ANO: 2022

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta Tese de Doutorado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte dessa Tese de Doutorado pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

Elizete Rocha da Costa
elizete2405@gmail.com
Brasília– DF – Brasil.

A minha família, e aos meus filhos Tiago Rocha e Hélio Júnior, por estar sempre presente em toda a minha caminhada, pelo inestimável apoio, compreensão e por terem sido sempre amáveis e carinhosos.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pois tem me presenteado com oportunidades maravilhosas e colocado pessoas mais que especiais em minha vida. Foi o Senhor Deus que, com seu cuidado, amor incondicional e zelo, me deu força para superar todos os desafios que enfrentei até aqui, pois, sem ele nada do que concluí ia ser possível de ser feito.

Certamente estes parágrafos não irão atender a todas as pessoas que fizeram parte dessa importante fase de minha vida. Portanto, desde já peço desculpas àquelas que não estão presentes entre essas palavras, mas elas podem estar certas de que fazem parte do meu pensamento e de minha gratidão. Meu eterno agradecimento.

Ao meu querido filho Tiago pelo apoio incondicional. Ao meu filho Hélio Junior por ser um filho maravilhoso, só posso agradecê-los, pois sempre me apoiaram em tudo, o que me possibilitou vencer essa importante etapa em minha vida.

A minha querida mãe Augusta, que mesmo de longe, sempre tinha um incentivo e com a voz amiga sempre me motivou a seguir com fé no eterno Deus, provedor de todas as coisas.

Aos colegas e mestres, em especial ao Professor Jorge, pelas inúmeras discussões sobre o desenvolvimento deste trabalho e braço amigo em todas as etapas para a conclusão. Aos demais professores, amigos e colegas, do laboratório de cabos do Grupo de Fadiga, Fratura e Materiais (GFFM) da Universidade de Brasília, do departamento de engenharia mecânica-ENM-UnB, pelo suporte técnico e apoio irrestrito para a execução dos ensaios experimentais, sempre com a maior presteza, ainda que em caráter emergencial.

Enfim, a todos que contribuíram mesmo que indiretamente para a realização desta pesquisa. Por tudo isso, só posso dizer o meu mais sincero obrigado!

UM ESTUDO EXPERIMENTAL SOBRE A INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA NO COMPORTAMENTO DA RESISTÊNCIA À FADIGA DE CABOS CONDUTORES DE ENERGIA FABRICADOS COM A LIGA AL 1350.

Autora: Elizete Rocha da Costa

Orientador: Jorge Luiz de Almeida Ferreira

Programa de Pós-Graduação em Ciências Mecânicas

Brasília, agosto 2022

RESUMO

Esta tese possui objetivos exploratórios de caráter experimental, cujo objetivo principal visa apresentar uma análise sobre como a influência da temperatura afeta a vida útil em fadiga do cabo condutor de energia Orchid. Neste sentido, para alcançar o objetivo geral foi implementado uma solução de engenharia baseada em um controle PID que proporciona condições reais de temperatura, cujos cabos de alta tensão são submetidos diariamente durante sua vida útil. Assim, foi projetado, desenvolvido e testado o equipamento controlado de aquecimento infravermelho para o teste de fadiga do cabo condutor. Desta forma, foi realizada uma série de testes para avaliar o dispositivo experimental e demonstrou excelente desempenho e operação satisfatória e os critérios operacionais foram cumpridos, para realizar o teste de fadiga nos cabos sob condições de alta temperatura. Dando sequência à investigação, foram realizadas duas etapas de ensaios sob condições de fadiga, ensaios em 75°C (temperatura máxima do condutor para cálculo da ampacidade) e em temperatura ambiente. Foi realizado um comparativo com dados da literatura na primeira etapa (E1), e um estudo somente com os ensaios realizados nesta tese em uma segunda etapa (E2). As análises da E1 permitiram verificar uma redução da ordem de 30% na vida útil das amostras testadas em 75°C, considerando como critério de falha a ruptura de 10% do número total de fios de alumínio. Assumindo a primeira falha do fio de alumínio como critério de falha, a redução média na vida útil do condutor foi de apenas 10%, e as análises da E2 corroboraram com este resultado e apresentou uma redução média de 9% entre as amplitudes ensaiadas, para as mesmas condições de ensaio. Esta comparação permite afirmar que o levantamento das curvas experimentais para a montagem cabo/grampo constitui-se em ferramenta interessante e estratégica para o projeto de linhas de transmissão, bem como estabelecer manutenção preventiva e corretiva de linhas de transmissão já existentes. Considerando estes resultados, observou que há espaço para melhorar as abordagens de projeto em altas temperaturas, podendo ser uma ferramenta valiosa para definir novos limites de projeto.

AN EXPERIMENTAL STUDY ON THE INFLUENCE OF TEMPERATURE OF THE FATIGUE RESISTANCE BEHAVIOR OF POWER CONDUCTOR CABLES MADE WITH AL 1350 ALLOY

Author: Elizete Rocha da Costa

Advisor: Jorge Luiz de Almeida Ferreira

Post-Graduation Program in Mechanical Sciences

Brasília, August 2022

ABSTRAT

This thesis has exploratory objectives of an experimental nature, whose main objective is to present an analysis of how the influence of temperature affects the fatigue life of the Orchid power cable. In this sense, to reach the general objective, an engineering solution was implemented based on a PID control that provides real temperature conditions, whose high voltage cables are subjected daily during their useful life. Thus, controlled infrared heating equipment for conductor cable fatigue testing was designed, developed and tested. In this way, a series of tests were carried out to evaluate the experimental device and it demonstrated excellent performance and satisfactory operation and the operational criteria were met, to carry out the fatigue test on the cables under high temperature conditions. Continuing the investigation, two stages of tests were carried out under fatigue conditions, tests at 75°C (maximum conductor temperature for ampacity calculation) and at room temperature. A comparison was made with data from the literature in the first stage (E1), and a study with only the tests carried out in this thesis in a second stage (E2). The analysis of E1 allowed to verify a reduction of the order of 30% in the useful life of the samples tested at 75°C, considering as failure criterion the rupture of 10% of the total number of aluminum wires. Assuming the first failure of the aluminum wire as a failure criterion, the average reduction in the useful life of the conductor was only 10%, and the E2 analyzes corroborated this result and presented an average reduction of 9% between the tested amplitudes, for the same test conditions. This comparison allows us to affirm that the survey of the experimental curves for the cable/clamp assembly constitutes an interesting and strategic tool for the design of transmission lines, as well as establishing preventive and corrective maintenance of existing transmission lines. Considering these results, it was observed that there is room to improve design approaches at high temperatures, which could be a valuable tool to define new design limits.

SUMÁRIO

CAPÍTULO I	1
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS E MOTIVAÇÃO	1
1.2 OBJETIVOS DA PESQUISA	6
1.3 JUSTIFICATIVAS DO TRABALHO	6
1.4 CONTRIBUIÇÃO.....	7
1.5 ESTADO DA ARTE	8
1.6 ORGANIZAÇÃO E ESTRUTURAÇÃO DO TRABALHO.....	12
CAPÍTULO II.....	14
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA, CABOS CONDUTORES	14
2.1 CARACTERÍSTICAS DO CABO CONDUTOR	14
2.2 FADIGA EM CABOS CONDUTORES	15
2.2.1 Mecanismos de Falha por Fadiga em Cabos Condutores.....	16
2.3 MÉTODO S-N OU CURVA DE WÖHLER.....	17
2.4 SOLUÇÃO ANALÍTICA PARA O CÁLCULO DA TENSÃO DINÂMICA	18
2.5 MÉTODOS PARA ESTIMATIVAS DA VIDA SOB FADIGA	20
2.6 CURVA LIMITE DE SEGURANÇA DA CIGRE.....	21
2.7 EFEITO DA TEMPERATURA NO COMPORTAMENTO EM FADIGA	22
2.7.1 Fadiga Térmica, Isotérmica e Termomecânica.	23
2.7.2 Propriedades intrínsecas do alumínio.....	23
2.8 ENSAIOS EM CABOS CONDUTORES.....	25
2.8.1 Bancada de Ensaio Mecânicos à Fadiga em Cabos Condutores	25
2.8.1.1 Descrição Da Bancada Construída	25
2.8.1.2 Mecanismos da bancada de teste	26
2.8.1.3 Sistema Para Detecção De Quebra De Fios	27
2.9 CONCEITOS FUNDAMENTAIS SOBRE CONTROLE.....	28
2.9.1 Sistema de Controle.....	28
2.9.1.1 Definições Importantes sobre Controle	29
2.9.1.2 Controle Proporcional Integrativo Derivativo (PID).....	30
2.9.2 Dispositivos para medidas, sensores	31
2.9.2.1 Termopares	32
2.9.3 Tipos de Aquecimento por Resistência	32
CAPÍTULO III	33

3	METODOLOGIA	33
3.1	CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA	33
3.1.1	Método e Análise.....	34
3.2	MATERIAIS.....	36
3.2.1	Cabo de Alumínio Nu Orchid 636,0 MCM	36
3.2.2	Grampo de suspensão Monoarticulado	37
3.3	DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA DE AQUECIMENTO CONTROLADO	38
3.3.1	Área da Instalação Física	38
3.3.2	Modelagem computacional do suporte para o conjunto de aquecimento .	39
3.3.3	Elementos de aquecimento por radiação infravermelho em cerâmica.....	41
3.3.4	Controlador Promocional Integral Derivativo (PID).....	42
3.3.5	Sistema de Controle e Aquecimento	43
3.3.5.1	Sistema Do Controlador	43
3.3.6	Cálculo da Potência Requerida pela Planta	45
3.3.6.1	Dimensionamento Da Potência Necessária Para O Sistema	45
3.3.6.2	Estimativa da Taxa de Variação da Energia Interna no Volume de Controle	46
3.3.6.3	Sistema De Aquecimento Resistivo	47
3.3.7	Implementação do Sistema de Aquecimento Controlado	48
3.3.7.1	Resposta Temporal De Aquecimento Do Sistema	49
3.3.7.2	Resposta De Regime Permanente Do Sistema De Aquecimento	51
3.3.8	Testes do equipamento de aquecimento controlado.....	53
3.4	PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS PARA EXECUÇÃO DOS ENSAIOS ..	58
3.4.1	Planejamento do Experimento	58
3.4.2	Instrumentação da Bancada	60
3.4.3	Preparação do cabo de ensaio e montagem na bancada	61
3.4.4	Sistema de Aquisição de Dados	66
3.4.5	Sistema de Controle das Bancadas	68
3.5	INSTRUMENTAÇÃO PARA DETECÇÃO DAS QUEBRAS USANDO	
	MEDIÇÕES COM STRAIN GAUGES (EXTENSÔMETROS DE RESISTÊNCIA	
	ELÉTRICA)	69
3.5.1	Leitura das Quebras em Tempo Real.....	71
3.6	COLETA DE DADOS DOS ENSAIOS DAS ETAPAS E1 & E2	72
3.6.1	ensaios em temperatura ambiente dados da literatura	75
3.6.2	Ensaio da Primeira Etapa (E1).....	76

3.6.2.1	Grupo de amostras com YB 0,87mm (GA-E1-A1-75°C)	76
3.6.2.2	Grupo de amostras com YB 0,91mm (GA-E1-A2-75°C)	77
3.6.2.3	Grupo de amostras com YB 1,01mm (GA-E1-A3-75°C)	79
3.6.3	Ensaio da Segunda Etapa (E2).....	80
3.6.3.1	Grupo de Amostras em temperatura de 21°C (E2-YBs-21°C).....	80
3.6.3.2	Grupo de Amostras em temperatura de 21°C (E2-YBs-75°C).....	81
CAPÍTULO VI.....		83
4	APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	83
4.1	TESTE DINÂMICO	84
4.1.1	Resultados para Carregamento Dinâmico	85
4.2	RESULTADOS DA CURVA S- N, COM TEMPERATURA CONTROLADA.....	89
4.2.1	Curva SN, em temperatura de 21°C e 75°C para os ensaios da E2	95
4.3	ANÁLISE DAS FALHAS.....	96
4.3.1	Padrão de ocorrências das quebras nos fios dos grupos E1 e E2	97
4.3.2	Mapeamento das quebras dos fios nos ensaios em temperatura de 75°C	99
4.3.3	Distância das Falhas em Relação a abertura do Grampo.....	102
4.3.4	Mapeamento da Posição e da Ordem de Ocorrência das Falhas.....	104
4.3.5	Avaliação das Superfícies de Falha.....	107
4.3.5.1	Avaliação Macroscópica das Superfícies de Falha.....	110
4.4	MAPEAMENTO DAS FALHAS E COMPARAÇÃO ENTRE ENSAIOS DA E1	114
4.4.1	Posicionamento das Falhas em Relação ao Grampo	120
4.4.2	Mapeamento do Padrão de ocorrências das quebras nos fios	121
4.4.3	Avaliação Macroscópica das Superfícies de Falha	123
CAPÍTULO V		126
5	CONCLUSÕES E SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS	126
5.1	CONCLUSÕES	126
5.2	SUGESTÕES PARA TRABALHO FUTUROS.....	129
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....		130
APÊNDICES		137

LISTA DE FIGURAS

Figura 2-1 – Cabos nus de alumínio CA, (Coutrim, 2013).	14
Figura 2-2 – Foto de um cabo condutor ACSR em corte a) e as regiões de contato b), (Fadel, 2010) Adaptado.....	17
Figura 2-3 – Esquema da montagem do cabo/grampo	19
Figura 2-4 – Curva <i>CSBL</i> , demais curvas compiladas pela CIGRE (Cigre, 1985) modificado....	21
Figura 2-5 – Desenho esquemático da montagem da bancada de ensaios (Fadel, 2010) modificado	26
Figura 2-6 – Esquema ilustrativo do sistema de detecção da quebra dos fios (Fadel, 2010) modificado	27
Figura 2-7 – Sistema de malha fechada de Controle PID (Ogata, Engenharia de controle moderno, 2011) modificado	30
Figura 3-1 Fluxograma dos procedimentos experimentais realizados nesta tese.....	33
Figura 3-2 – a) Desenho esquemático da seção do condutor CA Orchid e (b) amostra do condutor (Altec, 2015).....	36
Figura 3-3 – Especificações técnicas do grampo de suspensão monoarticulado (Forjasul, 2017) modificado	38
Figura 3-4 – Detalhe do local onde será acoplado o sistema de aquecimento	39
Figura 3-5 – Modelo 3D do suporte para o grampo de suspensão a) e posicionamento das resistências b).....	40
Figura 3-6 - Vista frontal a) e lateral b) do sistema acoplado ao equipamento de suporte	41
Figura 3-7 – Especificações do Elementos de aquecimento por radiação infravermelho em cerâmica.....	42
Figura 3-8- a) vista frontal do módulo e b) dimensões.....	43
Figura 3-9 - Diagrama esquemático do sistema de malha fechada.....	44
Figura 3-10 - Esquema elétrico do sistema de aquecimento controlado	44
Figura 3-11 – Representação das condições de troca térmica na amostra (conjunto cabo/grampo)	45
Figura 3-12 - esquema do circuito resistivo	47
Figura 3-13 - foto do controlador, a) visão interna, b) visão das saídas, e c) visão frontal.....	49
Figura 3-14 – Saída da temperatura medida no cabo, <i>setpoint</i> de 75°C atingido em 156 segundos	50
Figura 3-15 – Saída da temperatura medida no cabo, <i>setpoint</i> de 100°C atingido em 195 segundos	50
Figura 3-16 – Saída da temperatura medida no cabo, <i>setpoint</i> de 105°C atingido em 381 segundos	51
Figura 3-17 - Irradiação térmica de superfície.....	52
Figura 3-18 – Cabine de aquecimento finalizada	52
Figura 3-19 – Ponto de aferição de temperatura, lado oposto no UCP.....	54
Figura 3-20 – Ponto de aferição de temperatura no Laser	54
Figura 3-21 – Pontos de aferição de temperatura no Acelerômetro (Acc).....	55
Figura 3-22 – Ponto de aferição de temperatura, CE atrás da Cabine de aquecimento.....	55
Figura 3-23 – Comportamento das temperaturas no UPC.....	57
Figura 3-24 – Comportamento da temperatura nos pontos de aferição	58
Figura 3-25 – Conjunto de ancoragem do cabo em uma extremidade	61
Figura 3-26 – Conjunto de fixação da amostra na outra extremidade.....	62
Figura 3-27 – Montagem do cabo na mesa do <i>shaker</i>	63
Figura 3-28 – Braçadeira de Fixação ponto 89 mm	63
Figura 3-29 – Posição dos extensômetros colados no topo do CE.....	64
Figura 3-30 – Instalação do termopar tipo J, no detalhe ampliado.....	64
Figura 3-31 – Conjunto de detecção das quebras.....	65

Figura 3-32 – Interface do software <i>Aqdado</i> , com os canais já configurados	67
Figura 3-33 – Configuração do modo de aquisição para os ensaios de até 36 horas.....	68
Figura 3-34 – Extensômetros colados nos fios externos na base do CE	70
Figura 3-35 – Configuração dos extensômetros no CE.	70
Figura 3-36 – Indicação de quebras externas do ensaio EN-10-A ₁ -1/3-75°C.....	71
Figura 3-37 – indicação de quebras internas no ensaio EN-16-A ₁ -1/3-75°C.....	72
Figura 3-38 – Nomenclatura estabelecidas para os grupos de ensaios a), e para a descrição dos ensaios b).	74
Figura 3-39 - Grupo de ENSAIOS YB=0,87mm, GA-E1-A1-75°C	76
Figura 3-40 - Grupo de ensaios com YB= 0,91mm, GA-E1-A2-75°C.....	78
Figura 3-41 - Grupo de amostras com YB 1,01mm, GA-E1-A3-75°C	79
Figura 3-42 - Grupo de amostras com YBs de 0,87, 0,91 e 1,01 mm, do GA-E2-YBs-21°C.....	81
Figura 3-43 - Grupo de amostras com YBs de 0,87, 0,91 e 1,01 mm, do GA-E2-YBs-75°C.....	82
Figura 4-1 – Comparação entre valores experimental e calculado usando P-S, 75°C	86
Figura 4-2– Comparação entre valores experimental e calculado usando P-S, Amb	86
Figura 4-3 – Comparação entre valores de P-S em 75°C e temp Amb	87
Figura 4-4 – Comparação entre valores experimental e calculado usando P-S, 75°C	87
Figura 4-5 – Erro médio entre os resultados da tensão teórica x tensão experimental	88
Figura 4-6 – Erro médio entre os resultados da tensão teórica x tensão experimental.	88
Figura 4-7 – Duas linhas feitas ao redor do CE entre o UPC e 89 mm,	90
Figura 4-8 – Curva S–N, comparação para a primeira quebra, três pontos	92
Figura 4-9 – Comparação nas curvas S – N, para a média para primeira quebra	93
Figura 4-10 – Curva S–N das temperaturas ensaiadas, comparação com (CSBL) da CIGRE....	94
Figura 4-11 – Comparação da média para a Curva S–N, e comparação com a CSBL da CIGRE	94
Figura 4-12 – Comparação das curvas S – N, para primeira quebra.....	96
Figura 4-13 – Mapeamento dos fios no cabo de ensaio (CE).....	97
Figura 4-14 – Sistema de numeração dos fios externos de topo e base,.....	98
Figura 4-15 – Sistema de numeração dos fios internos de topo interno a) e base interna b)	99
Figura 4-16 – Mapeamento dos fios que romperam nos 12 ensaios, 75°C	100
Figura 4-17 – Resumo das incidências de quebras dos fios, para o grupo E1 com temperatura de 75°C	101
Figura 4-18 – Ocorrências de quebras dos fios, para o grupo E2.....	101
Figura 4-19 – Marca da abertura do grampo, DMF, e falhas no detalhe aumentado	102
Figura 4-20 – Procedimentos de medir a distância média das falhas em relação a abertura do grampo.....	103
Figura 4-21 – Análise da distância média (DMF) das falhas nos fios para todos os ensaios, 75°C e 21°C.....	103
Figura 4-22 – Comparativo de ocorrências da DMF no topo e Base do CE, 75°C e 21°C.....	104
Figura 4-23 – Incidência de falha por Camada para todos os ensaios, 75°C e 21°C.....	105
Figura 4-24 – Percentuais da incidência das falhas externas e internas, 75°C	106
Figura 4-25 – Percentual do total das falhas externas e internas, para os ensaios da E1, 75°C...	106
Figura 4-26 – Porcentagem das falhas por camada, para a análise da E2.....	107
Figura 4-27 – Distribuição de falhas por camada, para o grupo E2	107
Figura 4-28 Pó de Al ₂ O ₃ na vizinhança da boca do grampo de	108
Figura 4-29 – Pó de Al ₂ O ₃ no grampo de suspensão durante e após retirada da amostra.....	109
Figura 4-30 – Quantidade excessiva de oxido na amostra EN-09_A ₁ _3/3_75°C	109
Figura 4-31 – Quantidade excessiva de oxido retirada da EN-08_A ₃ _2/3_75°C e detalhe da quebra na C02.....	110
Figura 4-32 – Falha quase plana (QP) a)), inclinada em 45° b), semelhança com a letra “L” c), semelhança com a letra “V” d).....	111
Figura 4-33 – Frequências das morfologias das falhas EN–10_A ₁ _1/3_75°C.....	111
Figura 4-34 – Frequências das morfologias das falhas do EN–03_A ₂ _3/3_75°C	112

Figura 4-35 – Probabilidade do tipo de falha em todos os ensaios realizados em 75°C.	112
Figura 4-36 – porcentagem do tipo de falha em todos os ensaios realizados em 75°C.	113
Figura 4-37 – Superfície da Falha para as amplitudes de ensaio, em 75°C.	113
Figura 4-38 – Média da quantidade médias dos ciclos.	115
Figura 4-39 – Quantidade de falhas nas camadas em cada ensaio, temperaturas Amb e 75°C.	116
Figura 4-40 – Percentuais das falhas externas e internas, temperaturas Amb e 75°C.	117
Figura 4-41 – Distribuição das falhas por camada para cada amplitude, nas temperaturas Amb e 75°C.	117
Figura 4-42 – Ocorrências de quebras T e B, temperaturas Amb e 75°C.	118
Figura 4-43 – % ocorrências de quebras T e B, temperaturas Amb e 75°C.	118
Figura 4-44 – A figura 6-43 mostra o ensaio 9, que todos os fios se romperam durante o ensaio.	119
Figura 4-45 – Ocorrências de quebras nos fios de T e B, temperaturas Amb e 75°C.	119
Figura 4-46 – Análise da distância média (DFM) das falhas nos fios nas temperaturas Amb e 75°C.	120
Figura 4-47 – Distribuição das Quebras por Camada nas temperaturas Amb e 75°C.	120
Figura 4-48 – Padrão de repetição de falhas os fios, em temperaturas Amb e 75°C.	121
Figura 4-49 – Ocorrências de quebras T e B.	122
Figura 4-50 – Mapeamento das regiões com maiores incidências de falhas, a) para os ensaios em 75°C e b) em temperatura ambiente.	123
Figura 4-51 – Superfície da Falha para a amplitude 0,87 mm, nas temperaturas ambiente e em 75°C.	123
Figura 4-52 – Superfície da Falha para a amplitude 0,91 mm, nas temperaturas ambiente e em 75°C.	124
Figura 4-53 – Superfície da Falha para a amplitude 1,01 mm, nas temperaturas ambiente e em 75°C.	124
Figura 4-54 – Superfície da Falha para as amplitudes de ensaio, nas temperaturas ambiente e em 75°C.	125
Figura 4-55 – Tipos de Superfície da Falha, nas temperaturas ambiente e 75°C.	125
Figura C-1 – Detecção das quebras, sinais dos lasers.	146
Figura C-2 – Tensão de P-S x Tensão experimental nos fios em função do tempo.	147
Figura C-3 – Detecção das quebras, pela leitura dos lasers, EN-02 A1 2/3.	150
Figura C-4 – Detecção das quebras, sinais dos extensômetros colados nos fios externos. EN-09_A1_3/3_75°C.	152
Figura C-5 – Detecção das quebras, sinais dos lasers.	153
Figura C-6 – EN-09_A1_3/3_75°C, Tensão Experimental nos fios x P-S, durante o Ensaio.	153

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Comportamento da temperatura em °C, durante os ensaios	56
Tabela 4-1 – Tensão de flexão no UPC entre o condutor e o grampo de suspensão, 75°C	85
Tabela 4-2 – Tensão de flexão no UPC entre o condutor e o grampo de suspensão, <i>Amb</i>	85
Tabela 4-3 – Dados da evolução das falhas dos ensaios nas duas temperaturas	91
Tabela 4-4 – Relação de vida considerando o número médio de ciclos para a 1° e o 4° quebra	91
Tabela 4-5 – Ensaio <i>E2</i> , nas temperaturas de 21°C e 75°C	96
Tabela 4-6 – Quantidade de ciclos dos ensaios nas duas temperaturas.....	114

LISTA DE QUADROS

Quadro 2-1 – Comparação das propriedades físicas e mecânicas	15
Quadro 2-2 – Constantes da Curva Limite de Segurança (CSBL) (Cigre, 1985) modificado	22
Quadro 3-1– Propriedades mecânicas da liga de alumínio 1350-H19	37
Quadro 3-2 – Características dimensionais e estruturais do cabo condutor Orchid (ALTEC, 2015).....	37
Quadro 3-3 – Amplitudes de deslocamento prescritas nos ensaios EDS de 31%	59
Quadro 3-4 – Definições das condições de ensaios	59
Quadro 3-5 – Resumo da quantidade de ciclos de cada ensaio e cada cabo do GA-E1- A1-75°C.....	77
Quadro 3-6 - Resumo da quantidade de falhas de cada ensaio do GA-E1-A1-75°C,.....	77
Quadro 3-7 – Resumo da quantidade de ciclos de cada ensaio e cada cabo do GA-E1- A2-75°C.....	78
Quadro 3-8 - Resumo da quantidade de falhas de cada ensaio do GA-E1-A2-75°C,.....	78
Quadro 3-9 – <i>Resumo da quantidade de ciclos de cada ensaio e cada cabo do GA-E1-A3- 75°C.....</i>	<i>79</i>
Quadro 3-10 – <i>Resumo da quantidade de falhas de cada ensaio do GA-E1-A3-75°C</i>	<i>80</i>
Quadro 3-11 - Resumo do GA-E2-YBs-21°C, quantidade de ciclos de cada cabo de ensaio e ensaio	81
Quadro 3-12 – Resumo da quantidade de falhas de cada ensaio do GA-E2-YBs-21°C.	81
Quadro 3-13 – Resumo do GA-E2-YBs-75°C, quantidade de ciclos de cada CE, e EN..	82
Quadro 3-14 – Resumo da quantidade de falhas de cada ensaio do GA-E2-YBs-75°C.	82

Quadro 2-1 – Comparação das propriedades físicas e mecânicas	15
Quadro 2-2 – Constantes da Curva Limite de Segurança (CSBL) (Cigre, 1985) modificado	22
Quadro 3-1– Propriedades mecânicas da liga de alumínio 1350-H19	37
Quadro 3-2 – Características dimensionais e estruturais do cabo condutor Orchid (ALTEC, 2015).....	37
Quadro 3-3 – Amplitudes de deslocamento prescritas nos ensaios EDS de 31%	59
Quadro 3-4 – Definições das condições de ensaios	59
Quadro 3-5 – Resumo da quantidade de ciclos de cada ensaio e cada cabo do GA-E1- A1-75°C.....	77
Quadro 3-6 - Resumo da quantidade de falhas de cada ensaio do GA-E1-A1-75°C,.....	77
Quadro 3-7 – Resumo da quantidade de ciclos de cada ensaio e cada cabo do GA-E1- A2-75°C.....	78
Quadro 3-8 - Resumo da quantidade de falhas de cada ensaio do GA-E1-A2-75°C,.....	78
Quadro 3-9 – <i>Resumo da quantidade de ciclos de cada ensaio e cada cabo do GA-E1-A3- 75°C.....</i>	<i>79</i>
Quadro 3-10 – <i>Resumo da quantidade de falhas de cada ensaio do GA-E1-A3-75°C</i>	<i>80</i>
Quadro 3-11 - Resumo do GA-E2-YBs-21°C, quantidade de ciclos de cada cabo de ensaio e ensaio	81
Quadro 3-12 – Resumo da quantidade de falhas de cada ensaio do GA-E2-YBs-21°C.	81
Quadro 3-13 – Resumo do GA-E2-YBs-75°C, quantidade de ciclos de cada CE, e EN..	82
Quadro 3-14 – Resumo da quantidade de falhas de cada ensaio do GA-E2-YBs-75°C.	82

LISTA DE ABREVIACÕES

INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
ABRATE	Associao Brasileira das Grandes Empresas de Transmissão de Energia Elétrica
PID	Proporcional, Integral e Derivativo
CA (AAC)	Cabos de Alumínio (All Aluminium Conductor).
CAA (ASCR)	Cabos de Alumínio com Alma de Ao (Aluminium Conductor Steel Reinforced).
COPEL	Companhia Paraense de Energia.
CIGRE	Institute of Electrical and Electronics Engineers (Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrnicos).
EDS	<i>Every Day Stress</i> ou Carga diária média de tracionamento
EPRI	Electric Power Research Institute.
ERE	Extensmetro de Resistência Elétrica.
IACS	International Annealed Copper Standard.
LT	Linha de Transmissão
CSBL	Cigre's Safe Border Line
RMC	Resistência Mecânica Calculada)
UPC	último ponto de contato

LISTA DE SÍMBOLOS

- σ_L limite de resistência a fadiga.
- σ_a amplitude de tensão
- D diâmetro do condutor, [mm].
- d_{al} diâmetro do fio de alumínio [mm].
- E módulo de elasticidade, [GPa].
- E_a módulo de elasticidade do aço, [GPa].
- X_b distância de 89 mm
- E_{al} módulo de elasticidade do alumínio, [GPa].
- K constante da fórmula de *Poffenberger-Swart*.
- E_I momento rigidez à flexão do condutor (N.mm²)
- f frequência de aplicação da carga em ciclos por segundo, [Hz].
- n_a número de fio de aço.
- n_{al} número de fio de alumínio.
- d_a diâmetro do fio de aço [mm].
- d_{al} diâmetro do fio de alumínio [mm].
- E módulo de elasticidade, [GPa].
- N número de ciclos, [ciclos].
- N_f número de ciclos de vida, [ciclos].
- t tempo.
- ε Deformação, [μ strain].
- σ_a tensão alternada, [MPa].
- σ_m amplitude máxima
- σ_{ar} tensão normal média, [MPa].
- σ_m . tensão média, [MPa].
- Y_b coeficiente de fadiga ou tensão limite de resistência à fadiga do material, [Mpa]
- E_a módulo de elasticidade do aço, [GPa].

CAPÍTULO I

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS E MOTIVAÇÃO

Segundo as informações divulgadas pelo Northeast Group, L.L.C., ao longo da próxima década, as concessionárias de energia elétrica investirão US \$ 3,2 trilhões globalmente em infraestrutura de transmissão e distribuição (T & D) nova e de substituição. Esse investimento em infraestrutura será necessário, frente à crescente demanda de eletricidade. Outro fator contribuinte é o envelhecimento das redes existentes e a necessidade de novos projetos de geração de energia, incluindo recursos renováveis (Group 2016). Uma parte desses recursos será usada para eliminar as dificuldades relacionadas à capacidade de transmissão de energia pelas linhas existentes, já que em muitos países, particularmente na Europa e na América do Norte, os sistemas de transmissão estão bem estabelecidos e poucas novas linhas de transmissão estão sendo construídas. Segundo Gaudry, et al. (1998), isso está relacionado a existência de um mercado caracterizado por numerosos e muitas vezes divergentes fatores - desregulamentação e aumento das trocas comerciais de energia entre países, crescentes preocupações ambientais e uma diminuição nos investimentos de capital - as concessionárias elétricas tendem a favorecer a otimização das linhas existentes e a encontrar maneiras de aumentar a capacidade de seus sistemas de transmissão.

Diante dessa situação, várias empresas optaram por não modificar seus sistemas de transmissão, mas, ao contrário, relaxar seus critérios operacionais. Diversas estratégias podem ser usadas para atingir esse objetivo (Fazeli and Gillott 2013). Por exemplo, alterar os limites de transmissão de energia com base em condições climáticas sazonais (e mais restritivas) pode ser alterado por limites baseados nas condições reais que ocorrem a qualquer momento ou sob condições prováveis que podem ser previstas a curto prazo, conforme apresentado em (Gaudry and Chore 1998). No entanto, o aumento da ampacidade é alcançado à custa de um aumento substancial das perdas por efeito de Joule e consequente aumento da temperatura do cabo condutor. Uma alternativa é substituir os condutores padrão por aqueles que permitem faixas de operação em temperaturas de até 230 °C (Oogi, et al., 1997).

Haja vista, o fator sazonal no Brasil, que é um país tropical, com temperaturas elevadas em várias regiões durante a maior parte do ano. Isso propicia a exposição das linhas de transmissão (LTs) às influências climáticas. Conforme informações retiradas do site do Instituto Nacional de Meteorologia (Inmet, 2017) a média da temperatura ambiente registrada nos estados brasileiros permeia em 30°C. Nos últimos registros, a média em algumas regiões pode ultrapassar 40°C, conforme registro feito no estado do Ceará, na cidade de Sobral. Valores semelhantes que vêm sendo registrados em vários outros estados do Brasil. Partindo deste pressuposto, em cabos condutores de alumínio, o aumento da temperatura pode acarretar perdas de resistências mecânicas, conseqüentemente o aumento das flechas (Cavassin & Fernandes, 2012).

Para o projeto das linhas de transmissão de energia (LT) é necessária a observação de vários fatores, e parâmetros, pois há a necessidade de ser eficiente, confiável e econômica. Sendo assim, faz-se necessária a ausência de sobrecargas mecânicas e elétricas em seus elementos. Desta forma, isso exige projetos de maneira a manter o menor custo, obedecendo os parâmetros técnicos e com confiabilidade necessária. A escolha do condutor e o dimensionamento adequado da taxa de trabalho a tração são de suma importância para garantir a normalidade e minimizar as perdas de energia nos condutores. Uma vez satisfeitos estes parâmetros, a LT apresentará longa durabilidade (Fuchs et al., 1992). Um projeto mal dimensionado, pode induzir a ocorrência de sobrecorrente em horário de pico, com isso a linha pode trabalhar em altas temperaturas, ocorrendo desligamento emergencial de alguma das linhas na malha, com isso pode ocorrer sobrecargas nas linhas remanescentes, provocando aquecimentos ainda maiores. (Abreu, et al., 2010). Conseqüentemente, o alumínio convencional inicia processos de recozimento em temperaturas próximas a 95°C. Por essa razão, estudos envolvendo o efeito da temperatura no comportamento de condutores aéreos incluem, por exemplo, i) a determinação da capacidade de carga (Gaudry, et al., 1998), (Koval and Billinton 1970), (Chen, et al., 2002), (Kopsidas & Rowland, 2009), (Alvarez, et al., 2018), ii) avaliação do envelhecimento térmico (Havard et al. 1992), (Bhuiyan et al. 2010), (Chen et al. 2012) e (Armstrong et al. 2018), iii) avaliação de tensão (Kopsidas et al. 2010), (Ringelband, Schäfer, and Moser 2013), (Abbasi, et al., 2018) e (Abbasi, et al., 2018), iv) avaliação da classificação térmica dinâmica (Pytlak, et al., 2009) e (Pytlak, et al., 2011). Dados experimentais da curva S-N poderão contribuir para verificação dos requisitos de projetos seguros, a fim de atender os requisitos em projeto das LT de energia elétrica de forma eficiente. Exigindo assim cálculos e seleção de parâmetros

adequados para serem utilizados nos dimensionamentos dos condutores, para os projetos de novas linhas de transmissão, ou em caso de recapitação.

Os processos de fadiga em ligas de alumínio sob condições de alta temperatura e fadiga térmica têm sido amplamente estudados desde meados do século passado (Freudenthal and Weiner 1956), (Hardrath 1971), (Heath-Smith E Kiddle, 1973), (Vidal and Galmard, 1973), (Karayaka and Sehitoglu, 1991), (Srivatsan, Anand, et al., 2000) (Heath-Smith and Kiddle 2009) e (Tabibian, Charkaluk, et al., 2010). Dados de fadiga compilados por Kaufman (2008) mostram claramente que a resistência à fadiga das ligas de alumínio sofre reduções significativas ao trabalhar em temperaturas acima da temperatura ambiente. Em geral, a resistência mecânica dos metais diminui com o aumento da temperatura. Esse comportamento é explicado pela maior mobilidade dos átomos, o que facilita o processo de difusão e facilita o deslocamento devido ao processo de "escalada", o que o torna essencial devido à maior facilidade de difusão e pelo fato de a concentração de vazios em equilíbrio aumenta com o aumento da temperatura (Jones & Ashby, 2011). Assim, os modos de falha por fadiga e por fluência são facilitados devido a essa maior facilidade de movimento atômico.

Sendo assim, o desempenho das linhas de transmissão está diretamente relacionado com as características de seus componentes e sua configuração geométrica, pois dependem do desempenho técnico, elétrico e da capacidade para suportar solicitações mecânicas. Neste sentido, através dos ensaios experimentais em condutores aéreos, é possível estabelecer parâmetros fundamentais. Tais como os ensaios mecânicos, onde é possível prever a capacidade de suportar solicitações mecânicas, normais ou excepcionais, pois estarão sujeitos a carga de esticamento do condutor e das ações climáticas. (Fuchs, et al., 1992), (Fadel, 2010). Os testes servem para verificar a resistência do isolador e dos cabos a certas intempéries. Assim como os ensaios térmicos de fluência, que verificam a deformação plástica permanente (Castro, 2013), este tipo de ensaios são mais priorizados em materiais que serão utilizados em caldeiras e similares, onde os materiais podem ser danificados pelo efeito de temperaturas extremas, ocasionando acidentes, quando mal projetados (Cardoso, et al., 2011).

Segundo a ABRATE¹, o Brasil é composto por linhas ativas, relativamente antigas, dos quais sessenta e três mil quilômetros possuem mais de 15 anos. Diante deste cenário, uma das alternativas viáveis para as concessionárias é a recapitação das linhas que estão

¹Associação Brasileira das Grandes Empresas de Transmissão de Energia Elétrica (ABRATE)

sobrecarregadas (Tavares, 2013), (Verde, 2016). Para estes projetos, é necessária a utilização de condutores que trabalhem em temperaturas elevadas e que proporcionem maior capacidade de corrente, evitando-se a construção de novas linhas.

Porém, há o surgimento de novas tecnologias em cabos, capazes de trabalhos contínuos em temperaturas superiores a 200 °C, sem que haja prejuízo em suas propriedades mecânicas. O estudo de cabos sob o efeito da temperatura, é objeto de análise para o seguimento de projetos de linhas de transmissão (LT) (Souza, et al., 2011). Em projeto de recapacitação das linhas, ocorre o aumento da capacidade de corrente, para isso troca-se os cabos condutores, sem a mudança da estrutura existente. Com isso, surge a necessidade da utilização de condutores em regime contínuo de trabalho em temperaturas superiores a 150 °C (Souza, et al., 2011). Diante deste cenário, há uma demanda em ensaios experimentais, que forneça dados sobre o regime de trabalho dos cabos termo resistentes.

Técnicas para estudos e ensaios de fadiga têm surgido desde o fim do século XIX, neste sentido, o estudo da fadiga tem sido incentivado, de modo a prever riscos associados a este modo de falha (Ferreira, et al., 2011), (Fadel et al. 2012). Ressaltando os inúmeros trabalhos publicados sobre fadiga em cabos, verificando influência da tensão média e parâmetro H/w (Fadel, 2010), (Murça, 2011) e (Vieira, et al., 2017). Ainda sobre o tema fadiga em cabos condutores mostra que na última década foram encontrados trabalhos (entre artigos científicos, teses e dissertações), quase os trabalhos publicados (Lévesque et al. 2015), (Kalombo et al. 2017), (Lévesque et al. 2011), (Rhee et al. 2015), (Steier, Doca, and Araújo 2018), (Martínez et al. 2018), (Kalombo et al. 2018), (Azevedo et al. 2009), abordavam estudos experimentais na área de fadiga em cabos condutores e em nenhum deles observou-se análises experimentais que procurassem quantificar o efeito da temperatura na resistência à fadiga de cabos condutores.

Desta forma, evidenciou a necessidade de desenvolver estudos experimentais, onde se relaciona resistência à fadiga de cabos condutores de energia em temperaturas maiores que a temperatura ambiente, usando o controle da temperatura, como objeto de estudo, o que será abordado na proposta de pesquisa apresentada nesta tese. Sendo assim, é possível ressaltar que até o presente trabalho não foram encontrados na literatura dados experimentais disponíveis, sobre o efeito da temperatura em resistência à fadiga, de cabos condutores de energia elétrica fabricados com a liga de Al 1350 – H19. Mais estudos sobre o tema propiciará a comparação de dados experimentais com o comportamento mecânico real dos cabos já fabricados nesta liga,

podendo nortear em projetos de recapacitação das linhas, que possam proporcionar menores impactos ambientais.

O uso da automação e controle tem sido utilizado para desenvolver soluções de engenharia para desenvolver bancada de ensaios e aparato experimental para proporcionar estudo em cabos de alta tensão (Herek, 1997). Partindo deste pressuposto, a automação e uso de tecnologia embarcadas para a implementação e construção de dispositivo experimental para o estudo de fadiga pode ser empregado de forma satisfatória. A utilização de sistemas controlados para tais estudos, são provenientes de controladores de sistemas que tem como objetivo, fazer com que a saída alcance um dado valor de referência, dentro de uma faixa de tolerância, tanto em regime transitório como em regime permanente. Os Controladores do tipo proporcional integral derivativo (PID) são bastante utilizados em controles industriais, tais como controle de pressão, de nível, de velocidade, de temperatura, entre outros (Ogata, Engenharia de controle moderno, 2011). Na indústria, mais de 90% das malhas de controle são baseadas em controladores PID e suas variações, e em sua maioria são controladores PI. O desenvolvimento de sistemas supervisórios de controladores PID possui grande aplicabilidade para controlar grandezas pertinentes aos processos. Esses sistemas são projetados, com a resposta de um modelo de referência de segunda ordem e, a partir do conhecimento da planta a ser controlada, encontram-se os parâmetros de ganho proporcional, integral e derivativo do controlador PID. (Åström & Hägglund, 1995) Este controlador, utilizado em cascata com esta planta, possibilita um melhor desempenho, em que o maior esforço é determinar a inversa da função de transferência da planta, onde o valor desejado seja transferido diretamente para a saída do sistema.

Em contrapartida tem-se o sistema de controle *on-off* que é comumente utilizado no sistema de aquecimento. Porém, tal controle possui uma baixa robustez e um baixo rendimento energético. Já o controle fuzzy-PI como uma técnica alternativa para o controle da temperatura interna, proporciona maior robustez no controle. (Simões and Shaw, 2007). Esse tipo de sistema de controle pode ser desenvolvido tendo como base um microcontrolador que é capaz de comunicar-se via USB com um computador, o que possibilita a visualização da dinâmica do sistema de controle em tempo real.

1.2 OBJETIVOS DA PESQUISA

Esta pesquisa possui objetivos exploratórios de caráter experimental e visa apresentar uma contribuição sobre o efeito da temperatura no comportamento à fadiga de cabos condutores de energia. Nesse sentido, será desenvolvido e construído um dispositivo experimental de aquecimento controlado por sistema embarcado de controle Proporcional Integrativo Derivativo (PID), que permitirá a realização de ensaios de fadiga sob condições isotérmicas ou sob condições de fadiga térmica. Esse dispositivo será acoplado à bancada de ensaio do laboratório de cabos do Grupo de Fadiga, Fratura e Materiais (GFFM) da Universidade de Brasília. Por fim, um estudo sobre o comportamento de fadiga do cabo Orchid submetido a uma temperatura de 75 °C será realizado com a intenção de avaliar os impactos da temperatura na vida útil de cabo nus de alumínio condutores de energia elétrica.

Para a detecção das quebras, será implementada uma nova metodologia usando extensômetros e concomitantemente ao uso do sistema tradicional já consolidado no laboratório. A quantidade de ciclos em que cada quebra ocorre é importante para o levantamento da curva de durabilidade, tensão-vida (S-N) que será determinada por meio de ensaios de fadiga em condições de ensaios isotérmicos, onde se fará a análise comparativa de dados.

Observações sobre a geometria das quebras também serão realizadas, de modo que eventuais modificações sejam detectadas e possam explicar o comportamento mecânico observado sob o efeito da temperatura pesquisada.

1.3 JUSTIFICATIVAS DO TRABALHO

Atualmente há uma forte demanda das empresas de transmissão de energia elétrica para tentar prever a vida útil dos cabos condutores em situações climáticas típicas das regiões brasileiras a fim de diminuir os custos operacionais, e amenizar dificuldades operacionais associadas e para auxiliar nos projetos e instalações dos condutores. Em alguns casos, estudos se fazem necessários para a expansão das redes de alta tensão e o aumento da capacidade de transmissão de potência em trechos determinados.

Em uma linha de transmissão, o cabo condutor tem seu custo operacional em quase 40%, do custo da rede em sua totalidade. É sobre os cabos condutores que está a função de sustentar

as cargas mecânicas, elétricas e muitas vezes de efeitos provocados pela temperatura durante sua vida operacional estimada acima dos 50 anos.

Desta forma, para alcançar os objetivos aqui propostos, inicialmente serão pesquisados os modelos de aquecimentos e controle de temperatura existentes na literatura, o qual poderão ser implementados para uso no laboratório. Em seguida estudar-se-á o sistema embarcado que se adapta melhor à bancada de ensaios já instalada no laboratório do Grupo (GFFM). Após a implementação será realizado os ensaios para a calibração do dispositivo experimental dos ensaios e validação dos dados.

1.4 CONTRIBUIÇÃO

Obter a curva S-N experimentalmente e fazer um estudo comparativo sobre a influência no comportamento da resistência à fadiga em temperatura de 75°C e da temperatura ambiente, fazer o levantamento dos dados experimentais em situação de temperaturas próximas ao experimentados pelos cabos condutores de alumínio em uma linha de transmissão (LT), e fornecer dados experimentais requeridos em projetos para o cabo Orchid.

Face ao exposto, podem ser destacadas as contribuições advindas da metodologia de ensaios proposto neste trabalho, como a utilização e replicação do sistema controlado de aquecimento infravermelho, que pode ser utilizado para novas metodologias com facilidade de adaptação nas máquinas de tração como a máquina universal de ensaios oferecendo baixo custo para o aquecimento controlado das amostras possibilitando a realização de diversos tipos de ensaios isotérmicos. Nesta proposta, o equipamento experimental será acoplado à bancada de ensaios para a realização de ensaios estáticos e dinâmicos em cabos, a fim de investigar o comportamento de resistência à fadiga em cabos sob efeito da temperatura. Além disso, foi apresentada uma nova abordagem sobre a maneira de identificação das quebras internas no momento exato de cada ocorrência, com o uso de extensômetros.

Dentre as contribuições que serão apresentadas neste trabalho, será possível destacar algumas outras possibilidades de aplicação e uso para o dispositivo experimental de aquecimento que foi desenvolvido neste trabalho, com possibilidade de desenvolver pesquisas e prestação de serviços na avaliação do conjunto cabo-grampo em temperaturas elevadas, tais como os valores adotados em projetos de 75°C e 150°C, além de realizar os testes de fadiga

nas temperaturas de trabalhos dos cabos termoresistentes que podem trabalhar em temperaturas acima de 250°C.

Também se some a isto a possibilidade de avaliar os cabos disponíveis no mercado, tais como os em liga de alumínio, com alma de aço galvanizado – CAA (ACSR – *Aluminium Conductor Steel Reinforced*).

Dessa feita, possibilidade de estudar novos cabos com materiais com alma mecânica, tais como o Invar (Liga de Aço-Ni) e os compósitos tais como Fibras de óxido de Al e fibras de carbono, a fim de verificar a conveniência de sua utilização em projetos de recapacitação, já que estes cabos são projetados para operar em altas temperaturas, possibilitando o incremento da potência da linha de 40 a 50 por cento em relação aos condutores convencionais.

Há ainda a possibilidade de determinação dos valores reais dos parâmetros de temperatura das linhas existentes e sua comparação com os valores adotados nos projetos. Os dados podem permitir o uso dos condutores em condições reais de trabalho, possibilitando a otimização do projeto sob o ponto de vista econômico. Fazer predição de tempo de vida remanescente das LT existentes no Brasil e em outros lugares do mundo.

1.5 ESTADO DA ARTE

O estudo de fadigas em cabos de linhas de alta tensão está sendo estudado desde o início do século XX, sendo as primeiras publicações sobre o assunto foram publicados entre os anos de 1923 e 1933 (Nefzger, 1933). Dando sequência nos estudos sobre o tema, foram desenvolvidos por (Ramey & Silva, 1981) em laboratórios vibrações eólicas em cabos para linhas de transmissão, a fim de investigar os danos provocados pelas amplitudes e carregamentos cíclicos. Na ocasião, foram realizados mais de trinta e três testes em diferentes cabos ACSR (*aluminum conductor steel-reinforced*) também denominado de CAA (Cabo de Alumínio com Alma de Aço). Os resultados dos estudos indicaram que amplitudes menores que 0,30 mm aumentaram significativamente o tempo de vida do condutor, isso para os três tipos de cabos ensaiados. Embora alguns parâmetros de projetos não tenham sido verificados, puderam concluir que o uso de amortecedores, para reduzir a amplitude das vibrações eólicas, é uma solução interessante a fim de aumentar a vida em fadiga dos cabos ensaiados.

Além disso, a obtenção da curva S-N experimentalmente também foi estudada por (Ramey, et al., 1986), os autores fizeram 40 testes do cabo CAA (Alumínio com Alma de Aço) do tipo Drake, os fios de alumínio eram fabricados de liga 1350-H19, e os fios de aço com cobertura de zinco. As vibrações eólicas foram produzidas em laboratório, utilizando um excitador eletromagnético e eram reproduzidas na montagem do cabo/grampo de suspensão. Os autores concluíram que apesar do alumínio não possuir limite de fadiga definido, os testes mostraram que o cabo ensaiado apresentou um limite de fadiga em torno de 21 MPa, para ruptura do primeiro fio, além de apresentar um aumento nos níveis de dispersão quando ensaiados em tensões baixas, neste caso, apenas para a liga ensaiada.

Assim, Gopalan (1993) fez um experimento alternativo, no qual oscilações eram provocadas por forças eletromagnéticas entre dois cabos paralelos, sendo atraído e repelido pela ação do eletromagnetismo. Os cabos foram testados um em corrente alternada e o outro em corrente contínua e as oscilações produzidas eram próximas de suas frequências naturais. Alguns efeitos não foram considerados no estudo, como os efeitos da umidade, direção e variação do vento e efeito da temperatura. Todavia, o estudo pode fornecer parâmetros para avaliar a vida em fadiga dos cabos, em uma opção mais econômica em comparação com os testes realizados em campo.

Já no ano de 1995, um aparato experimental foi desenvolvido por Zhou, et al., (1995) para realizar testes de fadiga por *fretting* dos fios que compõem o cabo condutor de alumínio H19. O dispositivo experimental consistia em um motor-excêntrico, com um sistema mola-parafuso, e com um conjunto de sapatas cilíndricas. Que aplicava uma carga cíclica que provocava fadiga. Uma pré-tensão era induzida ao corpo de prova e transversalmente ao fio uma carga de contato era aplicada onde era simulado o contato entre fio e o grampo de suspensão e contato do fio. Testes foram realizados a fim de verificar a fadiga dos fios isolados e do conjunto dos fios do cabo. Testes completos foram realizados por (Zhou, et al., 1996), que mostraram resultados sobre desgastes em zona de escorregamento. Os autores destacam que, nos testes dos fios isolados, pode ser visualizada a zona de adesão, zona sem desgaste e zona de escorregamento, com parte do material perdido. O tamanho das zonas era proporcional às amplitudes aplicadas ao fio, ou seja, quanto maior a carga de fadiga aplicada, maiores eram os danos provocados e conseqüentemente menor a vida à fadiga do fio.

O estudo de cabos condutores em altas temperaturas teve início nos anos 90, em um projeto patrocinado pela COPEL (Companhia Paranaense de Energia). Para o propósito, foi desenvolvida uma bancada de ensaio para verificar o alongamento permanentes (fluência) dos

cabos, submetidas a temperaturas elevadas (Herek, 1997). Surgindo a necessária a construção de sistemas dedicados desenvolvidos para aquecer, verificar e controlar a temperatura e a resistência dos cabos e isoladores às variações mais ou menos bruscas da temperatura. (Jones, 2001), (Morgan, 1996) e (Barbieri & Júnior, 1999).

Foi concebida pelo engenheiro mecânico paranaense Osvaldo Herek a bancada de ensaios mecânicos de cabos condutores em altas temperaturas, a qual foi desenvolvida no ano de 1997 e foi instalada no Laboratório Central de Pesquisa e Desenvolvimento, no Centro Politécnico da Universidade Federal do Paraná em Curitiba, na ocasião, foi apresentada uma metodologia de ensaio de fluência em altas temperaturas em cabos. A bancada desenvolvida apresenta um aquecimento resistivo, o qual foi construído em um recinto fechado e isolado termicamente. Desta forma o teste de fluência podia ser realizado entre a temperatura ambiente e 473 K. Com possibilidade para verificar a dilatação térmica, tensão-deformação, amortecimento etc., voltado para o desenvolvimento de novos cabos. Foi construída para a bancada uma fonte de corrente de 3 kA, com alimentação de 220 volts. A medição dos deslocamentos foi realizada em trechos de 2 metros de comprimento (Herek, 1997).

Outra bancada construída para testes em cabos condutores de energia elétrica construída por Henrique (2006), sua construção e validação é detalhada em sua tese de doutorado em 2006, pela Universidade de Brasília (UnB). A bancada foi concebida para realização de ensaios de fadiga em cabos condutores de energia, foi projetada e construída seguindo as recomendações (CIGRE, 2007), (IEEE, 1980) e (IEC, 2010). Tem aproximadamente 47 m de comprimento e permite realizar ensaios em cabos de diferentes diâmetros. É dividido em vãos ativos (42 m) e passivos (5 m), tendo total controle e monitoramento em tempo real das condições pré-estabelecidas. O sistema construído permite monitorar temperatura ambiente, pré-tensão no cabo, força de aperto nos parafusos de fixação do grampo de suspensão, deslocamento em qualquer ponto da amostra em teste, frequência e força de excitação e a deformação nos fios da camada externa (62568:2015 IEC 2015).

Entretanto, os procedimentos de ensaios sobre o efeito da temperatura nos cabos condutores não evoluíram com as recentes inovações tecnológicas de aquisição e controle para todo tipo de material e componente. O teste de fluência geralmente é realizado em materiais e em componentes nos mais variados campos da engenharia, tais como; automobilístico, motores de aeronaves, química, plantas nucleares e potência, em que são submetidos à fadiga em elevadas temperaturas. A alta temperatura tem sido motivo de preocupação ao longo dos anos

(Freudenthal and Weiner 1956). Em casos que os materiais trabalham em extrema temperatura, como no caso dos componentes de turbinas a vapor, feito de baixa liga de aço Ferrítico e que costumam trabalhar em temperaturas em excesso, (por exemplo em torno de 565°C) os componentes são caros e possuem segurança crítica. Por isso, há grandes interesse na caracterização adequada em seu comportamento de fadiga em altas temperaturas (Stephens, et al., 2000)

Assim, publicações sobre monitoramento de temperatura em LT têm sido tema de estudo nas mais diversas áreas das engenharias em todo o mundo. Entre os temas estudados, pode-se citar o monitoramento das LT, realizado por Souza, et al. (2011) para a viabilidade de ampacidade. Entretanto, os autores ressaltam que apesar de satisfatórios os resultados, em algumas condições operativas da linha não obtiveram dados suficientes para verificar o comportamento do cabo em altas temperaturas. Estes trabalhos de P & D tem por finalidade pesquisar as necessidades do recondutoramento da linha de transmissão a fim de minimizar ou eliminar os danos ao meio ambiente, visando também a economia no projeto.

Então no ano 2009 foi publicada por Souza & Mannala (2009) a metodologia para diminuir o tempo de teste de fluência, onde foram descritas as etapas do processo. Segundo os autores a pré-montagem consistiu em uma etapa manual, realizada por duas pessoas, a amostra foi preparada de acordo com a norma NBR 7273 de 1982.

Sendo assim, ao longo dos anos várias técnicas para estudos de fadiga têm surgido há décadas, até os dias atuais, entretanto, o foco ainda permeia os materiais e dispositivos de engenharia. Principalmente o estudo de fadiga em alta temperatura (Hardell and Prakash 2010), (Perng, Hwang, and Doong 1993), (Skelton, 1987), (Boresi & Schmidt, 2002). Um fator que vem sendo estudado e são abordados por (Pytlak et al. 2011), (Balandin 1961), é o processo sobre fadiga térmica. Portanto, as ligas de alumínio sob condições de alta temperatura, e fadiga termomecânica é outro assunto vastamente estudado (Karayaka and Sehitoglu 1991), (Liu et al. 2008), assim destes estudos, é destacado por (Kaufman 2008) que mostra o efeito de gradativo da resistência à fadiga das ligas de alumínio, as quais sofrem reduções significativas ao trabalhar em temperaturas acima da temperatura ambiente. O fenômeno de fadiga pode ser potencializado, com o aumento da temperatura, neste sentido, o estudo da fadiga tem sido incentivado.

Importantes estudos sobre temperatura vêm sendo desenvolvidos, a fim de promover reestruturação nas redes para operar em desempenho eficiente de ampacidade, sendo assim

Lovrenčić, et al. (2015) ressalta a importância de manter a temperatura ideal de trabalho nos condutores. Ainda sobre estudos de temperatura nos condutores é possível destacar alguns estudos neste segmento, envolvendo a determinação da capacidade de carga e o efeito da temperatura no comportamento de condutores aéreos, devido a temperatura de trabalho segura dos cabos condutores de 75°C. Estudos envolvendo o efeito da temperatura no comportamento de condutores aéreos incluem a determinação da capacidade de corrente, que tem influência direta com o aumento da temperatura dos condutores, e são destacados em (Gaudry and Chore 1998), (Chen, et al., 2002) (Kopsidas & Rowland, 2009) e (Alvarez, et al., 2018). Assim, cálculos e seleção de parâmetros adequados para serem utilizados nos dimensionamentos dos condutores, para os projetos de novas linhas de transmissão, ou em caso de recapacitação, vem gerando grande número de publicações nos últimos anos (IEEE - PES 2013). No entanto, apesar do impacto da temperatura no comportamento dos cabos condutores estudados ressaltando os inúmeros trabalhos publicados sobre fadiga em cabos, mas nenhuma pesquisa particularmente relatando dados experimentais sobre o efeito da temperatura na resistência à fadiga de cabos condutores.

1.6 ORGANIZAÇÃO E ESTRUTURAÇÃO DO TRABALHO

Este trabalho encontra-se dividido em cinco capítulos, sendo este o primeiro, onde estão descritos os objetivos, a justificativa da proposta de pesquisa, os aspectos técnicos relacionados ao problema em estudo, uma revisão do estado da arte, bem como a definição da proposta de tese, apontando para as contribuições do trabalho proposto à pesquisa científica nesta área de conhecimento.

No segundo capítulo, intitulado de Fundamentação Teórica, Cabos Condutores é realizada uma revisão sucinta sobre cabos condutores, fadiga, temperatura fluência e a influência da temperatura em cabos de alta tensão. Também é feito a apresentação de alguns conceitos fundamentais que são primordiais para o entendimento do desenvolvimento do dispositivo para alcançar o objetivo geral do trabalho proposto nesta tese.

A metodologia é detalhada no terceiro capítulo, onde será exposto o projeto, construção e validação do dispositivo de aquecimento controlado para o aquecimento do conjunto cabo-grampo para os ensaios de fadiga com temperatura constante. Serão descritos o programa experimental e o desenvolvimento de uma nova metodologia de detecção das quebras com uso de extensômetros. Neste capítulo, são apresentadas as características dos materiais utilizados nos ensaios, o planejamento dos ensaios, além da descrição dos equipamentos e

métodos utilizados para obtenção dos dados para determinação da curva $S-N$ e das tensões experimentais.

O quarto capítulo refere-se à apresentação e discussão dos resultados obtidos nos ensaios experimentais, os resultados comparativos serão apresentados de forma separadas, a fim de um melhor entendimento dos resultados. Sendo assim, serão mostradas à avaliação dos resultados da extensometria para validar a fórmula de $P-S$ e avaliar a influência da tensão média sobre os resultados obtidos nos ensaios. Seguidamente, serão mostrados uma avaliação dos efeitos da temperatura em ensaios de fadiga na estimativa da vida útil do cabo condutor em duas situações em temperatura ambiente e $75\text{ }^{\circ}\text{C}$. Ainda neste capítulo será apresentado o mapeamento do comportamento da evolução dos fios rompidos em cada ensaio, nas duas condições de temperatura referente à análise das falhas.

Finalmente, no quinto capítulo, são apresentadas as considerações as conclusões finais acerca dos resultados obtidos, assim como como propostas de trabalho para o futuro que deve ser desenvolvido a fim de elucidar algumas lacunas e questionamentos que surgiram durante a exposição dos resultados apresentados neste estudo.

A presente tese conta com alguns apêndices, nos quais serão apresentadas informações referentes ao desenvolvimento do equipamento e validação durante os ensaios experimentais. Além disso, no apêndice descreve o comportamento particular de cada ensaio, que serão detalhados em um capítulo especial intitulado de “Memorial de Ensaio”. Onde será exposto o uso da nova abordagem de detecção das quebras com a aplicação de extensômetros, juntamente com comportamento da tensão de Poffenberger-Swart, em função do tempo de ensaio.

CAPÍTULO II

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA, CABOS CONDUTORES

Os cabos condutores são formados por um conjunto de fios encordoados, sem isolação entre si, com ou sem isolação externa. São cabos nus, figura 2.1, aqueles que não possuem proteção externa e isolados os que possuem capa protetora externa. Nas linhas aéreas se utilizam cabos nus de Al reforçado com alma de aço (tipo CAA ou ACSR). Sua vantagem em relação ao fio é a maior flexibilidade. Geralmente, é fabricado em forma cilíndrica com a função específica de transmitir energia e sinais elétricos. (Coutrim, 2013).



Figura 2-1 – Cabos nus de alumínio CA, (Coutrim, 2013).

Os cabos ideais para LT são os que apresentam alta condutibilidade elétrica, baixo custo, boa resistência mecânica, baixo peso específico e alta resistência à oxidação. Entretanto, encontrar todas estas propriedades em um mesmo material não é tarefa muito fácil. Dentre os materiais com maiores quantidades de propriedades agregadas estão o Al e o Cu e suas ligas, empregadas universalmente na fabricação de cabos nus para LT. O Al era extremamente caro até o final do século XIX, então a maioria dos cabos daquela época era de cobre. Outro fator que influenciava o seu uso era a baixa resistência mecânica. Que foi solucionada com a invenção dos cabos CAA (ACSR – *Aluminum Conductors Steel Reinforced*) utilizados com sucesso em 1913, na Califórnia (Fuchs, *Transmissão de Energia Elétrica Linhas Aéreas*, 1977).

2.1 CARACTERÍSTICAS DO CABO CONDUTOR

A resistência mecânica do Al, é amplamente compensada pelos benefícios e custo econômico representado hoje, aliado a novas tecnologias de fabricação de cabos de alumínio.

Pode ser observada no quadro 2.1 a comparação das características elétricas e mecânicas construtivas entre o Al e Cu.

Quadro 2-1 – Comparação das propriedades físicas e mecânicas

Características para têmpera dura	Alumínio	Cobre
Condutividade a 20�C IACS	61%	97 %
Resistividade em $\mu \Omega/\text{cm}$ a 20�C	2,828	1,7774
Coefficiente térmico de resistência, em $\mu \Omega/\text{cm}$ por �C	0,0115	0,00681
Coefficiente térmico de expansão linear por �C	0,000023	0,000017
Densidade g/cm^3 a 20�C	2,703	8,89
Carga de ruptura dem kg/mm^2	16-21	35-47
Modulo de elasticidade, final kg/mm^2	7000	12000

Fonte: (Fuchs, Transmissão de Energia Elétrica Linhas Aéreas, 1977) modificado

Pode-se observar que o Al apresenta uma condutividade de 61% IACS² em rela o ao cobre. Assim, para cada capacidade de corrente, a sec o transversal do condutor de Al fica 1,67 vezes maior do que a de cobre. Em contrapartida, o peso do Al   quase 3 vezes menor que o Cu. (Coutrim, 2013).

Sendo assim, o alumínio representa a soluço ideal para a LT e de distribui o, onde os cabos nus são empregados, tendo sua principal vantagem na rela o condutividade/peso. Por questões de custo, entre outros, a produ o de alumínio puro s  começou após a segunda guerra mundial. O Al s  veio a ser utilizado em LT em 1945, quando o preço, aliado ao seu melhor desempenho contribuiram para o desuso do cobre em LT (Fuchs, Transmissão de Energia Elétrica Linhas Aéreas, 1977).

2.2 FADIGA EM CABOS CONDUTORES

O cabo condutor pode representar até 40% o custo total em investimento total de uma rede, sendo os condutores responsáveis por sustentar cargas de origem mecânica, elétrica e do ambiente durante a sua vida útil. Sendo assim, os cabos estão sujeitos a vibra o eólica, que provoca a fadiga nos cabos. Entre os problemas mecânicos em LT, o considerado sendo o mais grave   a fadiga, conseqüentemente o mais complexo que ameaça a integridade da linha.

As linhas de transmissão são submetidas   aço do vento que causa a vibra o nos condutores aéreos, que se caracterizam por frequências eólicas que variam de 3 a 150 Hz e

² International Annealed Copper Standard. Escala de condutibilidade, cobre eletrolítico recozido, com pureza mínima de 99,9% e condutibilidade de 100% na escala da IACS

amplitudes que pode ser superior ao diâmetro do condutor. Este fenômeno ocorre basicamente pela combinação de dois fatores: i) A frequência de excitação do vento é igual a uma das frequências naturais do condutor, o que é fácil porque, em geral, a frequência natural de um cabo condutor em uma linha de transmissão varia em média $0,2 \text{ Hz}$. (ii) A velocidade do vento deve ser de 1 m/s a 7 m/s para induzir vibrações eólicas (Engineers 1980) (EPRI 2004). As vibrações causadas pelo vento causam esforços mecânicos cíclicos nos cabos condutores na região da montagem cabo/grampo de suspensão e, por causa disso pode ocorrer fadiga nos fios do condutor (Ramey and Silva 1981), (J. Wang 2008), o que pode causar falha mecânica do condutor e, conseqüentemente, causar danos significativos aos indivíduos e comunidades afetados pela interrupção do fornecimento de energia elétrica (Lévesque et al. 2015).

2.2.1 Mecanismos de Falha por Fadiga em Cabos Condutores

Uma das principais causas de fadiga em cabos de transmissão de energia elétrica é a flexão cíclica. As regiões do condutor mais sujeitas à falha são as que possuem restrição de movimento, o que gera flexão reversa no ponto de vinculação do condutor e a ferragem que impõem a restrição de movimento e escorregamento entre os fios do cabo, entre o condutor a ferragem que impõem a restrição de movimento (tais como os grampos de suspensão, grampos de ancoragem, as esferas sinalizadoras, os espaçadores etc), o que provoca o fenômeno de *fretting*. (Kalombo et al. 2015) e (Steier et al. 2014).

A vibração ocasionada pelos ventos pode ser agravada pelo ângulo de incidência, tipo de cabo e carga de estiramento. A vibração eólica é um dos maiores causadores de fadiga, que pode atingir níveis críticos até a ruptura do cabo. O fenômeno de excitação é provocado pela passagem dos ventos nos cabos condutores, que formam os vórtices, movimentando-os em movimentos alternados para cima e para baixo. Os tipos de vibrações que ocorrem em condutores aéreos são a eólica, o galope e o sub-vão (Fuchs, 1992).

No Brasil a vibração eólica é a mais comum devido ao regime dos ventos no país, pois, no Brasil não é comum o depósito de gelo sobre os cabos e a inexistência de acúmulo de gelo o que torna a vibração galope, comum de ocorrer (Abreu, et al., 2010).

O cabo condutor é formado por um grupo de fios dispostos concentricamente em relação a um fio central, formando coroas compostas de fios torcidos, helicoidalmente, em direções opostas a cada camada. No interior do grampo, o cabo condutor estabelece uma série de regiões de contato, quer entre fios de alumínio internamente, quer entre os fios e as ferragens na camada

mais externa do cabo. Tem se na figura 2.2, que a trinca de *fretting* pode ter origem em algum dos pontos de contato, o que gera a conseqüente falha do cabo.

Normalmente, a fadiga nos fios ocorre em pontos onde há restrição de movimento vibratório do condutor, causando tensões de flexão flutuantes (EPRI, 2006), (CIGRE, 1979). A restrição do movimento, o que ocasiona os escorregamentos entre fios, pode induzir trincas por *fretting*, que após se propagar pode proporcionar o rompimento dele. A severidade é agravada pela carga de contato, influenciada por fatores tais como; cargas de tracionamento, geometria, carga de aperto no grampo e o material do cabo condutor (Fadel, 2010).



Figura 2-2 – Foto de um cabo condutor ACSR em corte a) e as regiões de contato b), (Fadel, 2010) Adaptado

2.3 MÉTODO S-N OU CURVA DE WÖHLER

A abordagem mais usual para teste de resistência à fadiga em cabos condutores, são metodologias desenvolvidas a partir de conceitos oriundos das décadas de 1850 e 1860, em que o engenheiro August Wöhler desenvolveu testes experimentais, que propiciaram o desenvolvimento de um gráfico, para avaliar testes de fadiga (Wöhler A. , 1866). Os resultados de ensaio de fadiga, geralmente são apresentados em curvas, onde se relacionam a sollicitação de flexão, pelo número de ciclos. A curva é construída por vários ensaios em condições de baixas tensões, e com um número de ciclos elevados. Onde S1 diz respeito a um valor de sollicitações em que o corpo de prova rompeu em um determinado número de ciclos N1, e para uma sollicitação S2, se rompa em N2 e assim sucessivamente.

Os termos da curva, (S- N) “S” vem da palavra inglesa *stress*, que quer dizer tensão de flexão (σ_a), e N representa o número de ciclos. Se pode construir o diagrama S- N, com a tensão no eixo das ordenadas e os números de ciclos no eixo das abscissas. A tensão máxima, que praticamente não provoca mais a fratura por fadiga, chama-se limite de fadiga ou resistência à fadiga do metal considerado, cada tipo de material possui uma curva característica, e um limite de fadiga.

2.4 SOLUÇÃO ANALÍTICA PARA O CÁLCULO DA TENSÃO DINÂMICA

Em termos práticos, o grampo de suspensão é um dispositivo crítico na indução do processo de fadiga em condutores aéreos, devido a sua rigidez, uma restrição severa é introduzida no plano de vibração do condutor (plano vertical). Para descrever os materiais de engenharia relacionados à fadiga, é aplicado o método de tensão-vida. Este método correlaciona o número de ciclos necessários para quebrar a amostra submetida a tensões cíclicas nominais, permitindo assim a construção do diagrama de tensão-vida, diagrama S-N.

A caracterização das tensões mecânicas resultantes, como a σ_a do processo de vibração é um desafio para ser medido e modelado analiticamente ou numericamente (devido às complexidades envolvidas na mecânica interna do condutor, como plasticidade, rigidez de flexão variável e desgaste devido ao regime de contato de escorregamento parcial) (Lévesque et al. 2015). Por este motivo, a estimativa da curva SN baseia-se na execução de um conjunto de ensaios experimentais que buscam caracterizar o comportamento de fadiga da conexão cabo-grampo e a tensão de flexão do condutor próximo ao grampo de suspensão, é usualmente calculada com base em fórmulas semi-empíricas, que fornecem a tensão nominal idealizada. Esta tensão nominal idealizada pode ser usada para estabelecer e comparar a resistência à fadiga de diferentes condutores com base na tensão de flexão. Neste contexto, muitos pesquisadores usam a fórmula de *Poffenberger-Swart* (P-S) que define a relação entre a amplitude de deslocamento e a flexão sofrida pelos fios da camada externa que compõem o cabo condutor. Com o uso da fórmula os limites de fadiga são expressos em termos de tensão ou deformação e os cálculos desses parâmetros são medidos em função da amplitude vertical de deslocamento do cabo. Sendo assim, foi desenvolvida uma conexão entre a amplitude e a tensão, baseada nesta fórmula, que é uma solução analítica (Poffenberger and Swart 1965). A proposta foi introduzida pela IEEE a partir de 1996, baseada em propostas modernas de fadiga dos metais. A relação depende do vão entre cabo de grampo a grampo e sua rigidez à flexão. A resistência a fadiga do conjunto, cabo e grampo de suspensão é obtida de forma similar à utilizada para corpos de provas sólidos. A equação 2.2 é usualmente utilizada para correlacionar a amplitude de deslocamento medida, em uma posição a 89 mm do último ponto de contato entre o cabo e grampo, como ilustrado na figura 2.3 apresenta o esquemático da montagem cabo/grampo, mostrando a posição padrão para medida de amplitude de deslocamento Yb.

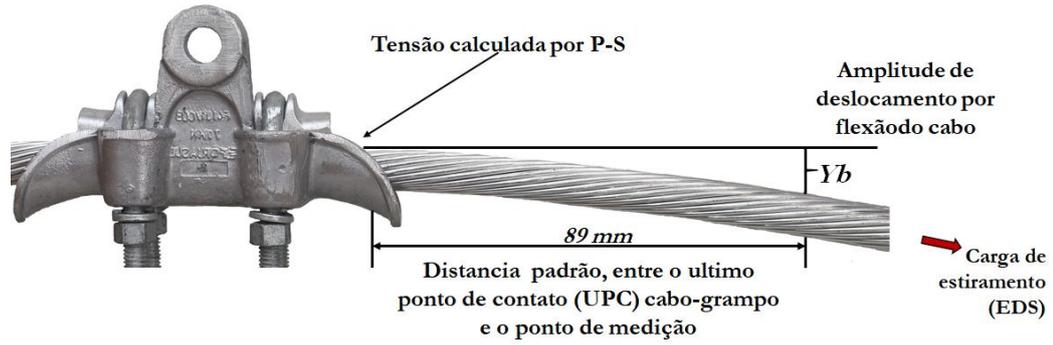


Figura 2-3 – Esquema da montagem do cabo/grampo

Para verificação da relação entre esforços dinâmicos, a amplitude de vibração pode ser calculada através da Equação de $P-S$, sendo σ_a a faixa de tensão dinâmica (de zero a pico),

$$\sigma_a = KY_b \quad (2-2)$$

o valor de Y_b é a amplitude de deslocamento pico a pico, medido a partir do último ponto de contato entre grampo e cabo de suspensão, sobre o cabo, distante 89 mm ; K é um parâmetro que expressa a rigidez à flexão do condutor, e é calculado da seguinte forma pela equação 2-3;

$$K = \frac{E_{al} d_{al} p^2}{4(e^{-pX_b} - 1 + pX_b)} \left(\frac{N}{\text{mm}^3} \right) \quad (2-3)$$

onde E_{al} é o módulo de elasticidade do alumínio (módulo de Young (MPa)); d_{al} é o diâmetro dos fios de alumínio da camada externa, dado em mm , (informação extraído do catálogo de fabricação do cabo); X_b é distância de 89 mm , do último ponto medido após o conjunto cabo-grampo e o ponto de medição do deslocamento vertical (veja a Figura 2.3); p é calculado pela seguinte relação apresentada em 2-4;

$$p = \sqrt{\frac{T}{E_I}} \quad (2-4)$$

onde $T[\text{N}]$ é a carga de esticamento para a temperatura média durante a medição, em Newton; E_I é a rigidez à flexão do condutor ($\text{N} \cdot \text{mm}^2$) é calculada pela expressão 2-5;

$$E_I = \frac{(n_s E_s \pi d_s^4) + (n_{al} E_{al} \pi d_{al}^4)}{64} \quad (2-5)$$

onde n_{al} é o número de fios de alumínio do cabo; E_{al} Módulo de elasticidade do alumínio; d_{al} é o diâmetro individual do fio de alumínio; n_s é o número de fios de aço que compõe o cabo; E_s é o módulo de elasticidade do aço; d_s é o diâmetro individual do fio de aço.

2.5 MÉTODOS PARA ESTIMATIVAS DA VIDA SOB FADIGA

Para estimar a vida em fadiga dos materiais para projetos, existem três métodos mais usuais; o método da vida sob tensão ($\sigma-N$), método da vida sob deformação ($\varepsilon-N$) e o método da mecânica da fratura linear elástica (MFLE). Estes métodos visam estimar a vida do elemento em decorrência da quantidade de ciclos de trabalho. É classificada em fadiga de baixo ciclo para vida de $1 \leq N \leq 10^3$ ciclos e para alto ciclo $N > 10^3$ ciclos.

O método ($S-N$) ou ($\sigma-N$) é um dos métodos mais simples de ser implementados. É mais preciso para análises de fadiga de alto ciclo, possui grande quantidade de resultados para suportes a novas análises, não faz distinção entre os estágios de propagação e faz estimativa de vida finita em fadiga.

O método ($\varepsilon-N$), que estuda mais a iniciação da trinca, pois envolve estudos da deformação plástica, é mais eficaz para fadiga de baixo ciclo.

Já o (MFLE) avalia a propagação da trinca, assumindo que ela já exista. É feita estimativa do crescimento da trinca em relação aos níveis de tensão. É mais aplicável para análises em grandes estruturas e aliado à implementação computacional (Shigley, Mischke, & Budynas, 2005).

Existem vários modelos empíricos para a vida em fadiga e crescimento da trinca sob fadiga. Dentre os modelos, o mais usual é o uso da curva ($S-N$) e os ajustes empíricos aos dados são realizados, quando é traçado em gráficos, apresenta as curvas de tensão e número de ciclos correspondente da falha para aquele carregamento específico. O modelo analítico mais usual para os ajustes é a relação de Basquin. Desenvolvida em 1910 por Olin Hanson Basquin mostrou que a relação $\sigma-N$ (S-N) pode ser linearizada (Basquimn, 1910), usando coordenadas logaritmos em ambos os eixos, estabelecendo uma lei exponencial da fadiga, definida por 2-12;

$$\sigma_a = \sigma'_f (2N_f)^b \quad (2-12)$$

onde σ_a é a tensão dinâmica em MPa; σ'_f é o coeficiente de resistência à fadiga, que para muitos metais é quase igual à tensão real na fratura, determinada no ensaio de tração; $2N_f$ é o número

de reversões; b (expoente de Basquin) que é o expoente de resistência à fadiga e são propriedades de fadiga dos materiais.

2.6 CURVA LIMITE DE SEGURANÇA DA CIGRE

A metodologia que utiliza a abordagem do dano cumulativo, proposta pela CIGRE (1985), foi definida a partir de uma curva estabelecida pelo Comitê de Estudos de Linhas Aéreas (SC 22), intitulada *Cigre's Safe Border Line* (CSBL). Esta curva foi obtida a partir de vários resultados de ensaios de fadiga realizados em diversos laboratórios do mundo, utilizando: fios de alumínio, fios de liga de alumínio, cabos de alumínio e de ligas de alumínio. A partir das curvas desses ensaios, a CSBL é uma curva que foi calculada para ficar abaixo dos resultados obtidos nos ensaios supracitados, representando uma estimativa conservadora da vida útil dos cabos e/ou fios. A Figura 2.4 ilustra a curva *Safe Border Line*, bem como as demais curvas compiladas pela CIGRE. À direita, as curvas superiores se referem a fios separados (Al liga e Al puro) e as curvas inferiores se referem aos cabos de alumínio liga de alumínio puro.

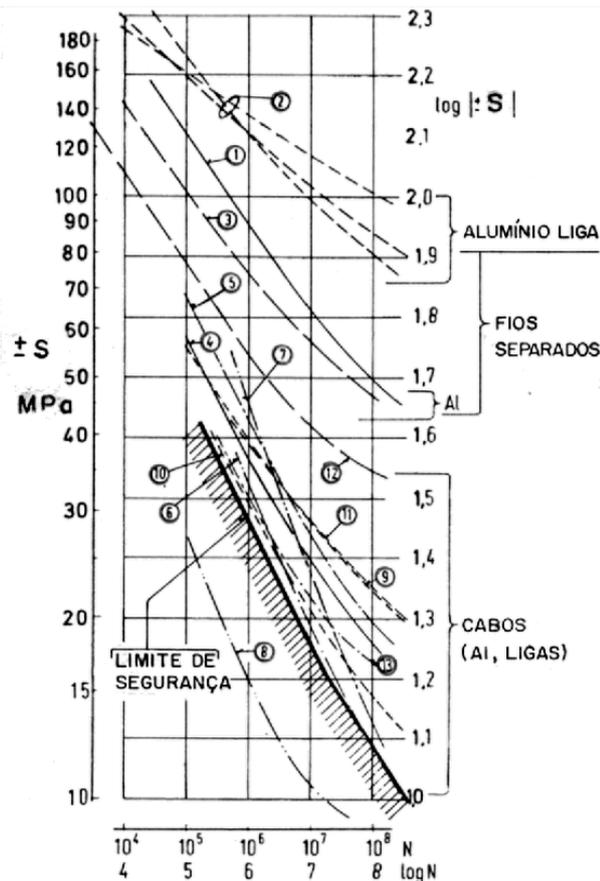


Figura 2-4 – Curva CSBL, demais curvas compiladas pela CIGRE (Cigre, 1985) modificado.

Neste trabalho será adotada a abordagem da CIGRE para estimativa da vida do condutor, a fim de fazer uma comparação da previsão de vida, que é fornecida pela CSBL. Desta forma, será estabelecida uma comparação, com aquela fornecida pelas curvas S-N obtidas para a montagem cabo Ochid/grampo de suspensão, em temperaturas ambiente e em 75°C, onde se fará uma avaliação.

A curva CSBL pode ser representada pela seguinte equação 2-21

$$\sigma_a = (AN)^b \quad (2-21)$$

onde σ_a é a tensão dinâmica em MPa, N é a vida em ciclos e A e b são constantes obtidas através do quadro 2.2, em que para estas constantes são utilizados valores diferenciados para cabos com uma ou mais camadas de fios de alumínio.

Quadro 2-2 – Constantes da Curva Limite de Segurança (CSBL) (Cigre, 1985) modificado

Nº de camadas de fios de alumínio do cabo condutor	N < 2.10 ⁷		N > 2.10 ⁷	
	A	b	A	b
1	730	-0,2	430	-0,168
>1	450	-0,2	263	-0,168

2.7 EFEITO DA TEMPERATURA NO COMPORTAMENTO EM FADIGA

O estudo do comportamento em fadiga e as previsões de vida, são mais complicados de serem realizados em altas temperaturas do que à temperatura ambiente, pois envolvem interações complexas entre processos térmicos dependente do tempo, como oxidação ambiental, deformação por fluência, e os aspectos metalúrgicos atuando juntamente com os fenômenos mecânicos de fadiga (Tecer et al. 2013). Fatores como a frequência, forma de onda e fluência, que são fatores secundários em temperatura ambiente em análise de fadiga, em temperaturas mais altas requerem uma análise mais aprofundada. A fadiga dependente do tempo pode ter melhores descrições em altas temperaturas. Nestas análises, a técnica de extrapolação é comum, pois permite resultados em prazos maiores a partir de testes em curto prazo. Tanto em trinca estática como em propagação de trinca por fadiga, a nucleação, crescimento de trinca e fraturas tendem a mudar de transcrystalino para intercrystalino à medida que a temperatura aumenta. Esta mudança ocorre em temperaturas mais elevadas para

condições de fadiga em comparação com condições de fluência. Em geral, a resistência à fadiga para um dado metal em um ambiente, diminui à medida que a temperatura aumenta (Stephens, Fuchgs, & Fatemi, Metal Fatigue in Engineering, 2000).

Componentes que trabalham em altas temperaturas e são submetidos a gradientes de temperaturas transitórias, ocasionado durante os ciclos de liga e desliga, podem ocorrer tensões cíclicas induzidas termicamente. Estes componentes estão sujeitos a danos tanto por fadiga quanto fluência, e cada um deve ser levado em consideração. As pás dos motores das turbinas de avião são exemplos de componentes frequentemente submetidos a fluência e fadiga (Stephens, Fatemi, R.Stephens, & Fuchs, 2000).

2.7.1 Fadiga Térmica, Isotérmica e Termomecânica.

Os estudos de fadiga em altas temperaturas podem ser classificados em três categorias: fadiga térmica, fadiga isotérmica e fadiga termomecânica. Assim, (Stephens, Fatemi, R.Stephens, & Fuchs, 2000) define fadiga térmica pelo aquecimento desigual de partes de um componente, onde variações de temperatura são comuns, produzindo tensões térmicas que podem levar a falha de fadiga. Em contrapartida, esta difere da fadiga isotérmica, na qual a temperatura permanece constante durante o carregamento cíclico (Silva 2004). Já a fadiga termomecânica é quando ocorrem variações simultâneas de carga (ou deformação) e temperatura, pode ser classificada em fase (0°) e fora de fase (180°), dependendo de a máxima deformação no ciclo ser atingida no instante de temperatura máxima ou mínima (J. J. A. Wang et al. 2008)

2.7.2 Propriedades intrínsecas do alumínio

O substantivo alumínio é originado do latim *alumem* cujo símbolo químico é Al, é um elemento metálico de cor prateada, possui em sua composição propriedades que o classifica como um dos materiais versáteis e mais utilizados na engenharia e na indústria em geral. (Callister e Rethwisch, 2014).

O alumínio só foi sintetizado pela primeira vez em 1825, quando o físico dinamarquês Hans Christian Orsted, em seus experimentos sobre a corrente elétrica, o isolou através do óxido de alumínio, a partir do cloreto de alumínio, através de redução na forma mais utilizada na atualidade (Brain, Cohen e Knudsen, 2007). Entretanto, a descoberta não ganhou muito destaque na época, e em 1827, Friedrich Whöler conseguiu isolar o alumínio em sua forma mais pura.

Por ser um material leve e resistente, e possuir boa maleabilidade, é perfeito para o uso em embalagens, arandelas, fios e cabos. É um material à prova de fogo, bom condutor de eletricidade e calor, tendo também vida longa e baixa manutenção. Isso torna viável tanto a sua produção, quanto sua reciclagem em seu estado natural. (Brandtzæg, 2012)

Sua reciclagem garante que cerca de 75% do alumínio produzido até hoje, continua em uso. Sendo apenas 5% da energia necessária na reciclagem, em relação à produção do alumínio primário, que é relativamente alto o processo de fabricação empregado atualmente.

Segundo Silva (2001) apesar de ter um consumo específico médio, considerado alto para a produção brasileira de alumínio primário, o índice brasileiro é inferior à média mundial, sendo de 14,8 Mega watt consumido por hora para produzir uma tonelada de alumínio primário.

Entre as propriedades físicas e químicas pode ser destacado as mais relevantes para a fabricação de cabos e acessórios utilizados em execução de projetos de LT tais como;

O alumínio é considerado um bom condutor de eletricidade, em temperatura ambiente. Embora sua condução seja apenas de 60% em relação ao cobre, sendo sua condutividade elétrica de $3,8 \text{ E}+7 \Omega \cdot \text{m}^{-1}$ enquanto o cobre apresenta condutividade elétrica de $6,0 \text{ E}+7 \Omega \cdot \text{m}^{-1}$. Outro detalhe que pode aumentar a resistividade do alumínio, e a facilidade de o material oxidar, o que inviabiliza certos contatos elétricos, pode ocorrer aquecimento local de contato.

Outra característica interessante do alumínio, que apresenta o fenômeno da supercondutividade em temperatura próxima de 0 Kelvins (K), chamado de temperatura crítica T_C , no caso do alumínio, o estado supercondutor acontece para uma T_C a 1,18 K. (Callister e Rethwisch, 2014)

O ponto de fusão do alumínio de 660,4 graus Celsius ($^{\circ}\text{C}$) é relativamente baixo quando comparado com outros metais primários, como o cobre, por exemplo, que possui ponto de fusão de 1085 $^{\circ}\text{C}$.

O alumínio é um material reativo, em temperaturas elevadas, cerca de 180 $^{\circ}\text{C}$, reage com a água, produzindo hidróxido de alumínio ($\text{Al}(\text{OH})_3$) e hidrogênio (H_2). Quando em contato com outros metais, produz seus respectivos óxidos e o óxido de alumínio (Al_2O_3). Suas propriedades térmicas o classificam como um bom condutor de calor, usado na indústria eletrônica como dissipadores de calor.

Cada material tem uma faixa de temperatura de trabalho especificado, onde a fluência pode não ser fator determinante para a falha, a liga de Al e Mg, por exemplo, apresenta melhor durabilidade de até 200 ou 300°C. (Stephens, Fuchgs e Fatemi, 2000)

2.8 ENSAIOS EM CABOS CONDUTORES

Durante as últimas décadas têm-se desenvolvido metodologias e aparatos para propiciar testes experimentais em cabos condutores no Brasil. Nas próximas seções será descrita uma bancada desenvolvida exclusivamente com este propósito.

2.8.1 Bancada de Ensaio Mecânicos à Fadiga em Cabos Condutores

A bancada descrita nesta seção foi projetada e concebida por Henrique (2006), como parte de seu doutorado na Universidade de Brasília. Na bancada, é possível realizar testes em cabos condutores com diâmetro de até 50 mm e o vão máximo ativo está entre 38 e 50 metros de comprimento. Possui sistema de monitoramento em tempo real, que informa todos os parâmetros pré-estabelecidos e faz o controle dos mesmos, além de fazer controle da tensão no cabo, força de aperto nos parafusos, deslocamento da amostra em teste, frequência de excitação, temperatura ambiente e a deformação da camada externa nos fios (Henrique, 2006).

2.8.1.1 Descrição Da Bancada Construída

Pode ser visualizado na figura 2.5 o desenho esquemático da bancada de ensaio (Fadel, 2010), que são divididos em dois vãos. O vão ativo é onde fica o cabo a ser testado, o que define seu tamanho, e pode variar de 31 a 46 metros. O vão passivo onde é realizada a fixação do cabo. Os blocos de concreto armado maciço garantem a rigidez na montagem do cabo de ensaio (CE) que são fixadas nas extremidades por grampos de ancoragem. Na figura 2.5 são destacadas seus elementos, representados por letras como segue: **a** esticador da amostra; **b** grampo de tensão; **c** grampo de suspensão; **c'** termopar **c''** arruelas instrumentadas (*load washers*); **d** acelerômetro a 89 mm da abertura do grampo de suspensão do cabo; **e** detector de torção do cabo; **f** transdutor de força; **g** acelerômetro; **h** excitador (*shaker*); **i** polia de apoio; **j** célula de carga; **l** braço de alavanca; **m** atuador linear; **n** contrapeso.

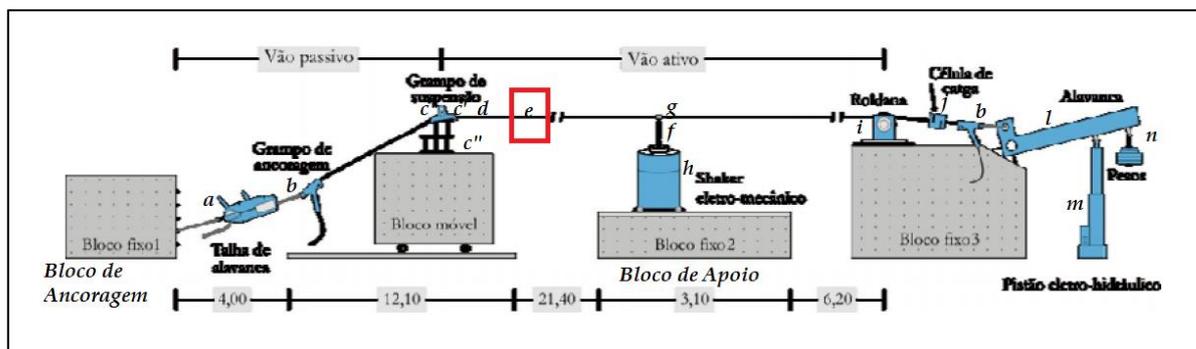


Figura 2-5 – Desenho esquemático da montagem da bancada de ensaios (Fadel, 2010) modificado

2.8.1.2 Mecanismos da bancada de teste

O cabo é fixado em uma das extremidades pelo grampo de fixação, que é acoplado ao extensor fixado ao bloco de ancoragem bloco.

A outra extremidade é fixada na célula de carga, na qual é fixado em um guincho de alavanca (letra *l* figura 2.5), onde é realizada a aplicação de carga, o que permite o controle do nível de carga de tracionamento.

Seria ideal possuir um ambiente com temperatura controlada, pois ocorre variação em torno de 2,5% na carga de tracionamento em função da variação da temperatura ambiente, devido aos gradientes de temperatura nas horas mais quentes do dia, o que ocasiona dilatação térmica nos cabos, sujeitando a amostra ao efeito de fluência (*creep*).

Para realizar o teste, é introduzida uma excitação mecânica. Esse procedimento é realizado através de um excitador eletrodinâmico (*shaker*) da *Labworks Inc.* ET – 127, montado sobre um bloco de apoio (letra *h* figura 2.5). A faixa de frequência de até 4,5 kHz. Equipamentos de monitoramento foram instalados a fim de verificar a frequência e força aplicada na hora do teste.

É possível controlar a força de aperto no grampo de suspensão através das arruelas instrumentadas (*load washers*) (letra *c''* figura 2.5), também é possível aumentar o vão ativo para realizar o teste com amostra de tamanho distinto. Este procedimento é realizado devido a montagem do grampo de suspensão estar sobre um bloco de concreto móvel sobre trilho, que se desloca de acordo com o tamanho da amostra a ser testada. Sendo assim, as amostras podem variar na faixa de 37 a 46 metros (Henrique, 2006).

2.8.1.3 Sistema Para Detecção De Quebra De Fios

Para detectar a quebra dos fios do condutor, foi desenvolvido um dispositivo de detecção de quebras. O mecanismo acusa a variação do ângulo nas régulas de acordo com as falhas dos fios no CE. Pode-se observar o esquema na figura 2.6 do funcionamento das medidas dos ângulos, (Fadel, 2010), possui duas barras de alumínio, que acopladas ao cabo por abraçadeiras com dois sensores a laser com a capacidade de medidas de 16 a 120 mm e resolução de 2 a 100 μm , trabalham em conjunto com um sistema de aquisição de dados modular, capaz de captar sinais analógicos e digitais de controle e monitoramento do sistema. Geralmente, são coletados os sinais de temperatura, extensômetros, célula de carga, sensores de deslocamento e acelerômetros.

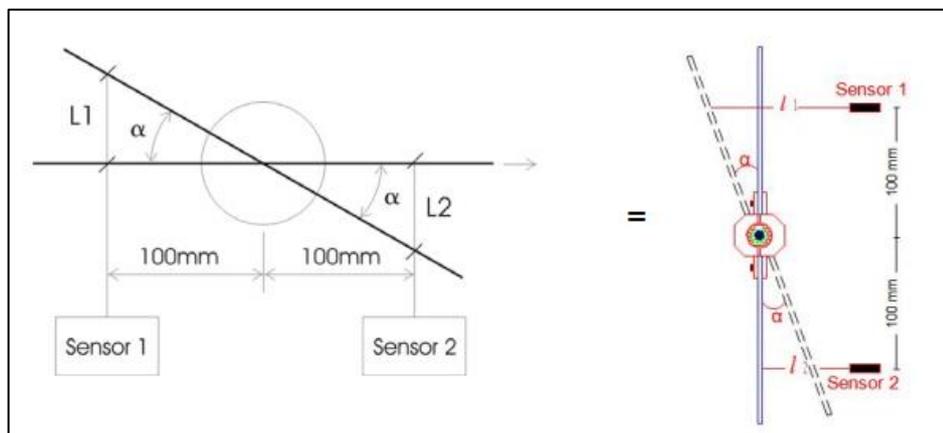


Figura 2-6 – Esquema ilustrativo do sistema de detecção da quebra dos fios (Fadel, 2010) modificado

Os sensores 1 e 2 são responsáveis pela determinação das medidas de rotação do cabo, para medir a torção promovida pela quebra. O dispositivo foi desenvolvido baseado na geometria de construção do cabo, pois quando há quebra ocorrem acomodações nos demais fios, ocasionando o giro no sentido contrário ao enrolamento da construção do cabo. A medida do giro é realizada através da detecção de quebras e é determinada através da equação 2-20;

$$a = \arctg \frac{(l_1 - l_2)}{200} \quad (2-20)$$

onde; a é a medida de abertura do ângulo; l_1 e l_2 , são os deslocamentos das barras verticais em relação ao plano horizontal. Os sinais são captados por um aquisitor de dados, através de um software TFC, desenvolvido para detecção das quebras.

A bancada possui sistema de controle que é realizado através de *software* dedicado. Quando a quantidade de ciclos programados acaba, o ensaio é finalizado automaticamente. É possível

realizar ensaios com carregamentos senoidais, ensaios randômicos ou de choques. Na maioria dos ensaios realizados de fadiga o carregamento senoidal tem sido escolhido.

É importante ressaltar que muitos trabalhos publicados no Brasil sobre fadiga, a parte experimental foram realizados nas bancadas de testes de condutores aéreos do Laboratório de Fadiga e Integridade Estrutural de Condutores Aéreos da Universidade de Brasília (UnB) no Brasil. Descrições mais completas das bancadas de ensaio, bem como uma história de sua evolução, podem ser encontradas nas referências (Azevedo et al. 2009), (Fadel et al. 2012), (Kalombo et al. 2015) e (Badibanga 2017).

2.9 CONCEITOS FUNDAMENTAIS SOBRE CONTROLE

Nesta seção serão apresentados alguns conceitos fundamentais, embora sejam básicos da engenharia, alguns são necessários para a melhor compreensão da metodologia desenvolvida nesta pesquisa. Desta forma, serão descritos alguns conceitos para o entendimento da implementação do sistema de aquecimento controlado e instrumentação dos ensaios experimentais.

2.9.1 Sistema de Controle

Sistema de controle conforme definido por (Ogata, Engenharia de controle moderno, 2011) é a relação estabelecida entre uma saída e uma entrada de referência, utilizando a diferença entre ambos para estabelecer o controle, denominado sistema de realimentação. Já para (Dorf & Bishop, 2011), sistema de controle é a ligação entre componentes que farão a configuração do sistema a fim de produzir a resposta desejada. Ambas as definições apresentam a preocupação em controlar uma saída desejada. Em todas as soluções de engenharia, há uma grande aplicabilidade de sistemas controlados. Nesta pesquisa, há a necessidade de aplicar um sistema controlado, a fim de obter uma temperatura constante no conjunto cabo-grampo, o mais indicado para a aplicação é o controlador do tipo PID que são os mais utilizados em ambientes industriais.

Nomes que contribuíram para o desenvolvimento da teoria de controle entre 1922 e 1934 são *Minorsky*, *Hazen* e *Nyquist*. Em 1940 e 1950, muitos sistemas de controle industrial já usavam controladores PID no controle de pressão e temperatura, baseado em resposta em

frequência, onde receberam contribuições de *Bode, Ziegler e Nichols* (Ogata, Engenharia de controle moderno, 2011).

2.9.1.1 Definições Importantes sobre Controle

Em sistema de controle é necessário trabalhar com variáveis controladas e manipuladas. Variável controlada é a grandeza ou condição que será medida e controlada. Já a variável manipulada ou sinal de controle é a condição modificada pelo controlador de modo a afetar a variável controlada, que geralmente é a saída da planta sistema.

As plantas do sistema podem ser uma parte do equipamento ou um conjunto de componentes que faça parte de um equipamento, porém que funcione de forma integrada, a fim de desempenhar um processo específico. São as modificações graduais necessárias para o controle do sistema.

Sendo o sistema a combinação de componentes que vão agir em conjunto para atingir o objetivo, possuirá alguns distúrbios. Que são sinais que afetam a variável de saída do sistema, sendo necessário um controle de realimentação. Uma operação executada na presença de distúrbios, diante das diferenças de sinal de entrada de referência e saída, trabalha de forma a diminuir e compensar os erros gerados pelos distúrbios internos e externos do sistema (Dorf & Bishop, 2011; Ogata, Engenharia de controle moderno, 2011)

Os sistemas de controle podem ser classificados como malha aberta e malha fechada. Os de malha aberta são aqueles nos quais a saída do sistema não é utilizada como parâmetro para correção da entrada. Um exemplo é uma máquina de lavar roupas que ao ser ligada passa por uma sequência de ações para realizar a lavagem. Todo o processo não é verificado para saber se a roupa está limpa o suficiente. A máquina apenas realiza o que já foi programado.

No sistema de malha aberta, o sistema se comporta de maneira pré-definida e caso haja qualquer distúrbio durante o processo não há um controle de erros. Este tipo de malha é de custo menor e é mais fácil de ser implementado quando não há alto grau de complexidade no processo, já que todos os processos que o sistema irá realizar já estão definidos (Nise N. S., 2012).

Em malha fechada, o sistema possui uma realimentação e a saída faz parte do sinal que é enviado na entrada do sistema. Exemplificando o que foi dito, tome o seguinte caso: um sistema de aquecimento ao ser ligado possui uma temperatura que é tida como o *set-point* do sistema e

há sensores que a todo momento enviam dados da temperatura para o controlador. Isto fará com que ele aumente ou diminua a potência do aquecimento para chegar à temperatura desejada. O sistema em malha fechada possui realimentação e isto faz com que este seja capaz de adequar-se a mudanças no ambiente manipulado. Este tipo de malha possui custo mais elevado e implementação mais difícil na maioria dos casos, mas para situações complexas onde há muita perturbação nos valores manipulados é uma ótima opção.

2.9.1.2 Controle Proporcional Integrativo Derivativo (PID)

O controle PID, é uma combinação dos modos de controle P, I, e D, que utiliza todos os princípios de controle, reunindo suas melhores características. Esta é uma técnica de controle clássica que se aplica apenas a sistemas com uma entrada e uma saída (*Single Input Single Output* - SISO). O controle por malha PID utiliza o desvio, ou seja, a diferença, entre o valor esperado de uma variável de processo e seu valor medido por meio de um transdutor, possibilitando um controle com boa estabilidade e baixo erro de *offset* (Vu & Esfandiari, 1998).

Usando a técnica de controle PID, que consiste em calcular um valor de atuação sobre o processo a partir das informações de valores escolhidos de temperatura, o controlador tenta diminuir o erro que foi gerado pela saída, ajustando suas entradas, tornando assim o sistema mais robusto, e garantindo um controle estável e preciso.

Na figura 2.11 pode-se visualizar um sistema de malha fechada de Controle PID, onde as três equações fazem correção de erro, correção proporcional em relação ao tempo e correção proporcional a taxa de variação do erro. A soma de três termos: um termo proporcional ao erro, um termo proporcional a integral do erro e um termo proporcional a derivada do erro.

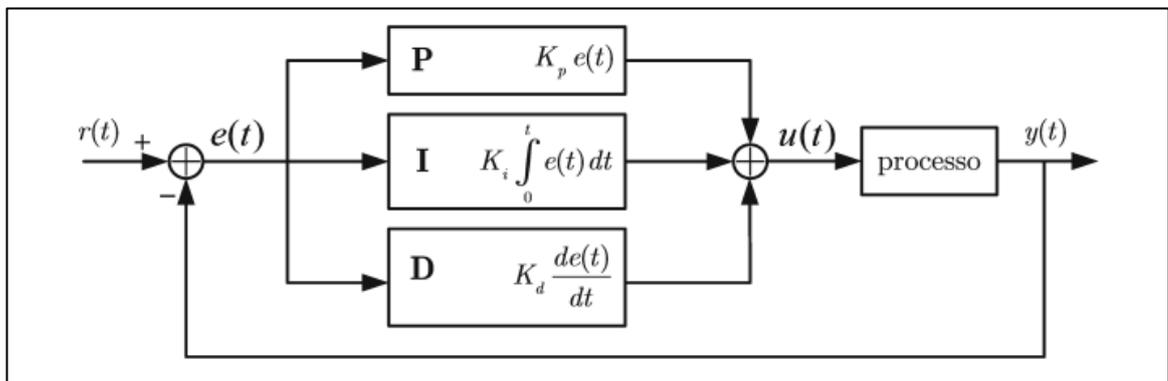


Figura 2-7 – Sistema de malha fechada de Controle PID (Ogata, Engenharia de controle moderno, 2011) modificado

Os controladores PID são controladores com *feedback* muito utilizados em automação industrial. Esses controladores calculam um erro entre o valor medido na saída e o valor desejado no processo (Vu & Esfandiari, 1998).

O cálculo do controlador PID envolve três parâmetros: Proporcional, Integral e Derivativo. A ação de controle PID é dada pela equação 2-21:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{d}{dt} e(t) \quad (2-21)$$

onde $u(t)$ é a saída em relação ao tempo, $e(t)$ é a entrada menos o erro em relação ao tempo, K_p é a constante proporcional, K_i é a constante integral e K_d é a constante derivativa. A técnica de controle PID será usada para minimizar o erro de leitura dos sensores, através dessa lógica fará um melhor controle da temperatura da peça dos ensaios (Ogata, 2011).

O controle proposto utilizará a temperatura medida e fará a comparação com a temperatura escolhida pelo usuário. A diferença entre esses valores gera um erro. O controlador PID atua sobre esse erro, gerando um sinal de controle que atua sobre o processo, fazendo com que a temperatura medida seja próxima da temperatura escolhida para realizar o ensaio.

2.9.2 Dispositivos para medidas, sensores

O sensor é um dispositivo que, ao receber um estímulo físico ou químico, responde de maneira específica e que pode ser transformado em outra grandeza física. Assim, um sensor trabalha associado a um transdutor que transforma estímulo em uma grandeza elétrica para fins de medidas ou monitoramento.

Transdutor é um dispositivo que converte um tipo de energia em outro, ou seja, transforma este estímulo de uma energia térmica em energia elétrica para fins de observação, também chamado de medidor. Os sensores podem ser classificados de acordo com os transdutores associados, assim, entre os sensores de temperatura têm-se os termômetros, termopares, resistores sensíveis a temperatura (termistores), termômetros bimetálicos e termostatos (Balbinot & Brusamarello, 2011).

2.9.2.1 Termopares

Os Termopares são sensores simples, robustos e de maior uso industrial para medição de temperatura. São amplamente utilizados em vários processos de medição de temperatura. Eles medem em uma faixa bastante extensa de temperatura, aproximadamente de -200°C a 2300°C , com uma boa precisão e com medidas que são repetidas, com custos bem inferiores quando comparado com outros tipos de sensores de temperatura.

O fenômeno da termoeletricidade foi descoberto em 1821 por *T. J. Seebeck*, quando notou que em um circuito fechado formado por dois condutores metálicos e distintos A e B, quando submetidos a um diferencial entre as suas junções, gera uma circulação de corrente elétrica (i). O aquecimento de dois metais diferentes com temperaturas distintas em suas extremidades proporciona o aparecimento de uma força eletro-motriz F.E.M. (da ordem de mV). Este fenômeno propiciou a utilização do princípio de *Seebeck* na utilização de termopares para medição de temperatura.

Embora seu uso seja relativamente simples, alguns fatores contribuem para os erros de medidas dos termopares tais como perturbações induzidas pela sonda, efeitos catalíticos, efeitos de transferência de calor, pirômetros de sucção. As perturbações induzidas na sonda podem ser causadas por reações nas superfícies, de natureza química, poço de calor por reação térmica, natureza aerodinâmica, por geometria indesejada (Pallàs-Areny & Webster, 2001)

2.9.3 Tipos de Aquecimento por Resistência

Existem dois métodos utilizados no aquecimento por resistência elétrica: método de aquecimento por resistência direta e indireta, no aquecimento de resistência direta a corrente passa pelo corpo ao ser aquecida. Alguns processos industriais empregam esse método. Um exemplo desse método é usado em caldeira para aquecimento de água. Já no aquecimento a resistência indireta, a corrente passa através de um fio ou outro material de alta resistência que forma um elemento de aquecimento. O calor produzido é transmitido por radiação ou convecção para o corpo a ser aquecido. Este método é o mais utilizado em vários tipos de fornos de resistências e industriais e tratamento térmico de metais. (Theraja & Theraja, 2007). Este método será adotado para o desenvolvimento do sistema de aquecimento.

CAPÍTULO III

3 METODOLOGIA

Neste capítulo, serão descritas todas as etapas da metodologia utilizada neste trabalho, com o objetivo de expor os caminhos percorridos em todos eles. Serão detalhados os passos construtivos do aparato de aquecimento para a bancada, descrições dos equipamentos e instrumentos. Por fim a instrumentação para o levantamento de dados para o estudo. Tendo como base o referencial teórico, segundo o método adotado, pretende-se mostrar de forma clara e objetiva os fenômenos observados, com o intuito de responder ao problema de pesquisa, “Qual é a influência da temperatura nos ensaios de fadiga no cabo de alumínio puro Orchid”.

A fim de facilitar o entendimento, a figura 3.1 apresenta todos os procedimentos experimentais realizados nesta tese, ficando evidente a realização de duas etapas de ensaios, sendo que a etapa E2, foi realizada para a consolidação dos resultados, haja vista, que os resultados da E1, foram dados da literatura, com ensaios realizados com outro lote de amostras.

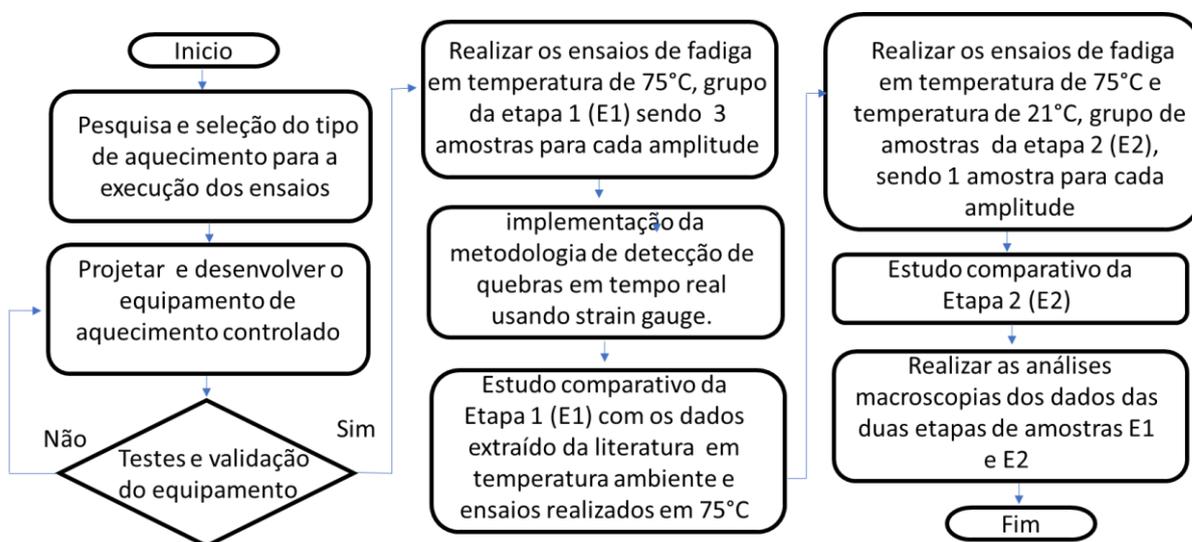


Figura 3-1 Fluxograma dos procedimentos experimentais realizados nesta tese

3.1 CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA

Esta pesquisa possui finalidade básica, pois pretende oferecer uma contribuição básica estratégica com os resultados de pesquisa exploratória. Os dados coletados estão em condição de pesquisa primária original, servindo de base para trabalhos futuros, pois os resultados podem

servir de parâmetros para futuros projetos em LT. Pretende-se assim, realizar um estudo sobre os testes de fadiga em cabos nus de alumínio em condições de temperatura isotérmica, a fim de explorar a hipótese da pesquisa, que consiste em verificar a influência da temperatura na fadiga dos cabos.

A pesquisa possui objetivos exploratórios, pois se trata de uma investigação do efeito da temperatura em ensaios de fadiga, no que tange à pesquisa realizada em cabos condutores nus de liga de *Al*, e será reportada neste trabalho. Pretende-se explorar o comportamento do conjunto cabo e grampo em condições de fadiga e temperatura isotérmica. É uma pesquisa experimental, pois os procedimentos técnicos padronizados dos ensaios exploratórios estão de acordo com as recomendações da CIGRE (1985), EPRI (1979), IEEE (1978) (2008) e IEC (62568:2015 IEC, 2015) para obtenção da estimativa de vida da montagem condutor/grampo à fadiga sob efeito da temperatura. Todos os ensaios serão realizados no âmbito do laboratório de cabos Grupo de Fadiga, Fratura e Materiais (GFFM) e serão analisadas as variáveis de temperatura e fadiga, onde serão comparados os impactos mecânicos com o efeito da temperatura.

Os ensaios foram realizados sob temperatura de 75°C , que é classificação de temperatura de trabalho em operação contínua do condutor. Esta temperatura é adotada para cálculo de capacidade de corrente. Ou seja, este valor é um dos parâmetros utilizados para o cálculo de ampacidade em projetos de linha de transmissão. Este parâmetro foi escolhido por ser a temperatura do condutor em condições para cálculo da Ampacidade, e não existem dados experimentais de fadiga nesta temperatura para o cabo Orchid.

Para isso, os procedimentos serão realizados em caráter experimental, tendo como base as normas correlacionadas supracitadas, para sistematizar as técnicas de ensaios desenvolvida neste projeto. Assim sendo, serão descritas todas as etapas necessárias para a realização dos ensaios com controle de temperatura para alcançar o objetivo geral da pesquisa, sobre as variáveis de temperatura e fadiga observadas, a fim de explicitar possível explicação para os fenômenos observados.

3.1.1 Método e Análise

O método dedutivo será empregado neste trabalho, pois a motivação veio da observação geral sobre comportamentos dos ensaios em condição de fadiga em temperatura ambiente e será comparada com os ensaios de fadiga em temperatura de 75°C . Pretende-se assim explorar uma

nova premissa sobre fadiga em temperatura constante, empregando em ensaios de fadiga em cabos de alta tensão.

Geralmente a resistência em fadiga da montagem cabo/grampo de suspensão é obtida por meio de métodos experimentais, de forma parecida àquela usada para corpos sólidos de prova. Os ensaios de flexão cíclica, que mantém a amplitude de tensão, são executados e são verificadas as rupturas dos fios de alumínio, registrando-se o número de ciclos experimentado pela montagem até o instante de cada quebra (Fadel et al. 2012). A curva $S-N$ será gerada mantendo-se constante a tensão e a temperatura do condutor no UPC entre o condutor e o grampo de suspensão. A quebra dos fios do condutor foi monitorada, e registrando o número de ciclos. Os ensaios de fadiga sob temperatura, também se concentraram na montagem do grampo de suspensão com o cabo, já que esta é a zona crítica do sistema de montagem cabo/grampo (EPRI, 2006).

Para o levantamento da curva $S-N$ a temperatura de $75^{\circ}C$ é concentrada na área de ocorrência de falha, que é o conjunto cabo/grampo de suspensão, e será mantido do início ao final do ensaio. Este procedimento foi adotado considerando que a fadiga é um fenômeno extremamente localizado e tende a ocorrer em regiões onde os condutores aéreos apresentam restrições em seu movimento vibratório (como aqueles que ocorrem na vizinhança dos grampos de suspensão, bolas de marcação, amortecedores e espaçadores).

A caracterização do efeito da temperatura constitui-se em fazer o levantamento da curva $S-N$ em duas situações, com resultados em temperatura ambiente e com temperatura de $75^{\circ}C$ constante. Para efeito comparativo, será construída a curva $S-N$ baseada nos ensaios realizados e dos resultados já publicados por (Badibanga, 2017).

Para os ensaios com controle de temperatura, serão realizados ensaios de fadiga isotérmica, a fim de estudar o comportamento no conjunto cabo e grampo que serão descritos na seção 3.2. Desta forma, procurou reproduzir em laboratório a temperatura de trabalho em condições de operação em campo. Para manter a temperatura constante, será necessário o desenvolvimento de um sistema de aquecimento controlado, o qual as etapas de implementação, construção e validação serão descritas na seção 3.3.

A abordagem usada para as análises será quali-quantitativa, tendo análises qualitativas e quantitativas. Para as análises qualitativas, buscar-se-á um caráter subjetivo, tendo como base a literatura, para os resultados valorativos. Para as análises quantitativas, e por se tratar de um volume considerado de dados coletados durante os ensaios, pretende-se usar ferramentas e

técnicas estatísticas, para essa parte do estudo. Os resultados passarão por análises estatísticas, cujas conclusões serão obtidas em grau de probabilidade.

3.2 MATERIAIS

Nesta seção, serão descritos todos os elementos envolvidos no projeto, tanto no âmbito dos ensaios de fadiga isotérmica, como os materiais utilizados para o desenvolvimento do sistema de aquecimento controlado. Inicialmente serão descritos os objetos de estudo, como do tipo de cabo a ser testado e grampo articulado usado nos ensaios. Em sequência, serão abordados os materiais do sistema de aquecimento controlado.

3.2.1 Cabo de Alumínio Nu Orchid 636,0 MCM

Os cabos de alumínio nus do tipo *All-Aluminum Conductors (AAC)*, EC 1350 ou Cabos de Alumínio CA, EC 1350, são compostos por fios de alumínio 1350 encordoados em coroas concêntricas. Classe AA (Condutores nus usados em linhas aéreas) são amplamente utilizadas em linhas de transmissão pelo Brasil e no mundo.

Os ensaios foram realizados no condutor tipo CA Orchid 636,0 MCM 37x3,33. Esse condutor possui três camadas com encordoamento concêntrico, sendo a mais interna formada por 6 fios de alumínio dispostos concêntricamente em torno de um fio central. A camada intermediária tem 12 fios de alumínio e a camada externa formada por 18 fios, como apresenta a Figura 3.2 a). Cada camada, encordoada com encordoamento concêntrico helicoidalmente, é disposta sempre em sentido oposto ao da camada vizinha, gerando a formação de 37 fios, que caracteriza o cabo Orchid, figura 3.2 b) (Altec, 2015).

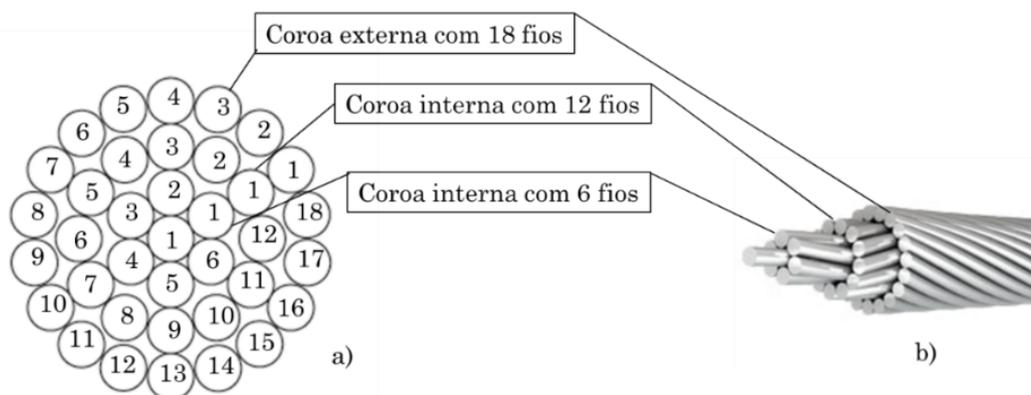


Figura 3-2 – a) Desenho esquemático da seção do condutor CA Orchid e (b) amostra do condutor (Altec, 2015)

Os cabos CA Orchid são padronizados de acordo com as normas NBR 7271 para Cabos de alumínio para linhas aéreas e ASTM B 231M Concentric – lay – stranded aluminum 1350 conductors. As características técnicas, propriedades físicas e mecânicas do cabo foram retiradas do catálogo técnico da (Altec, 2015). As características estruturais e dimensionais do condutor e as propriedades mecânicas da liga de alumínio 1350-H19, são apresentados nos quadros 3.1 e 3.2.

Quadro 3-1– Propriedades mecânicas da liga de alumínio 1350-H19

Propriedades Físicas e Mecânicas	Unidades	valor
Coefficiente de Poisson	–	0,33
Densidade	Kg/m^3	2705
Dureza Brinell	–	50
Elongação na Quebra (<i>Min</i>)	%	1,5
Limite de escoamento	<i>MPa</i>	165
Limite de Resistência à Tração	<i>MPa</i>	186
Módulo de Elasticidade	<i>GPa</i>	68,9
Resistência a Fadiga para 50×10^6 Ciclos	<i>MPa</i>	48,3
Resistência ao Cisalhamento	<i>MPa</i>	103

Quadro 3-2 – Características dimensionais e estruturais do cabo condutor Orchid (ALTEC, 2015)

Descrição	
Área mm^2	322,24
Bitola AWG ou MCM	636,0
Formação, Número x Diâmetro dos Fios: (<i>mm</i>)	$37 \times 3,33$
Diâmetro Nominal do Cabo (<i>mm</i>)	23,31
Número de fios de cada camada	18 – 12 – 6 – 1
Massa Linear kg/km	888,44
Carga de Ruptura kgf	5143

3.2.2 Grampo de suspensão Monoarticulado

Os grampos de suspensão são utilizados para conectar os condutores nas torres de suspensão. Os grampos utilizados nos ensaios são fabricados pela Forjasul, do tipo monoarticulado com diâmetro mínimo de 17 *mm* e máximo de 29 *mm*, carga de ruptura de 70 *kN* e peso total de 1,280 *kg*. São peças resistentes à corrosão, com elevada resistência mecânica, e que não apresentam propriedades magnéticas.

Parafusos, porcas e arruelas são fabricados em aço galvanizado a quente. Suas dimensões reduzidas foram projetadas para não danificarem os cabos em um ângulo de 20°C e são adequadas para o uso em cabos CA ou CAA. A figura 3.3 a) perspectiva, 3.3 b) vista lateral, 3.3 c) vista do corte central, 3.3 d) apresentam as especificações técnicas do grampo de suspensão (Forjasul, 2017),

o mesmo modelo do grampo de suspensão monoarticulado foi usado nos ensaios, tanto em temperatura ambiente, como em temperatura de 75°C.

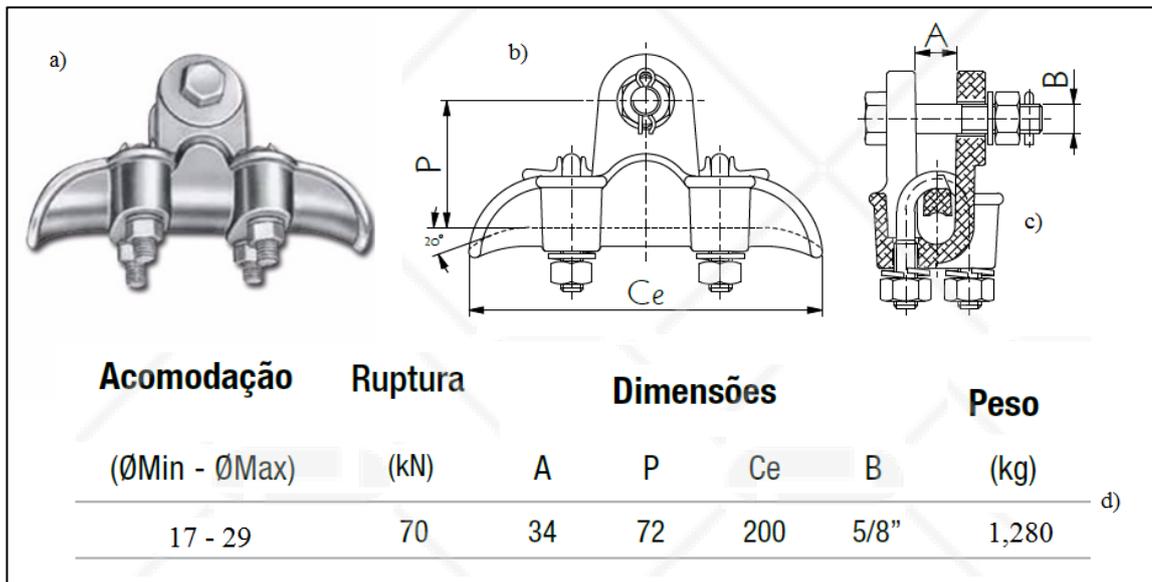


Figura 3-3 – Especificações técnicas do grampo de suspensão monoarticulado (Forjasul, 2017) modificado

3.3 DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA DE AQUECIMENTO CONTROLADO

O equipamento de aquecimento controlado foi concebido para ser acoplado na bancada de ensaio do laboratório de cabos do Grupo de Fadiga, Fratura e Materiais (GFFM) da Universidade de Brasília. Assim, para o desenvolvimento deste projeto de pesquisa, foi necessário fazer uma adequação na bancada original do laboratório. Para tal propósito, houve a necessidade da elaboração de um projeto do sistema de aquecimento controlado e executar sua construção para ser instalado na bancada do laboratório GFFM.

Sendo assim, nesta seção, será descrita as etapas para o desenvolvimento do sistema de aquecimento controlado para a realização dos ensaios nos cabos em altas temperaturas, desta forma são apresentados todos os materiais selecionados, juntamente com o esquema elétrico, etapas construtivas e testes.

3.3.1 Área da Instalação Física

O sistema de aquecimento será acoplado em torno do cabo/grampo de suspensão, no vão passivo da bancada, conforme indicado na figura 3.4 no detalhe da figura a foto do cabo/grampo de suspensão que será mantido aquecido durante o ensaio. Desta feita, este é o local onde será

montado a cabine aberta de aquecimento. Na figura 3.4 também é apresentado parte do desenho esquemático da bancada de ensaio que está em operação no laboratório GFFM da universidade de Brasília, a bancada completa foi anteriormente descrita no capítulo 2 desta tese.

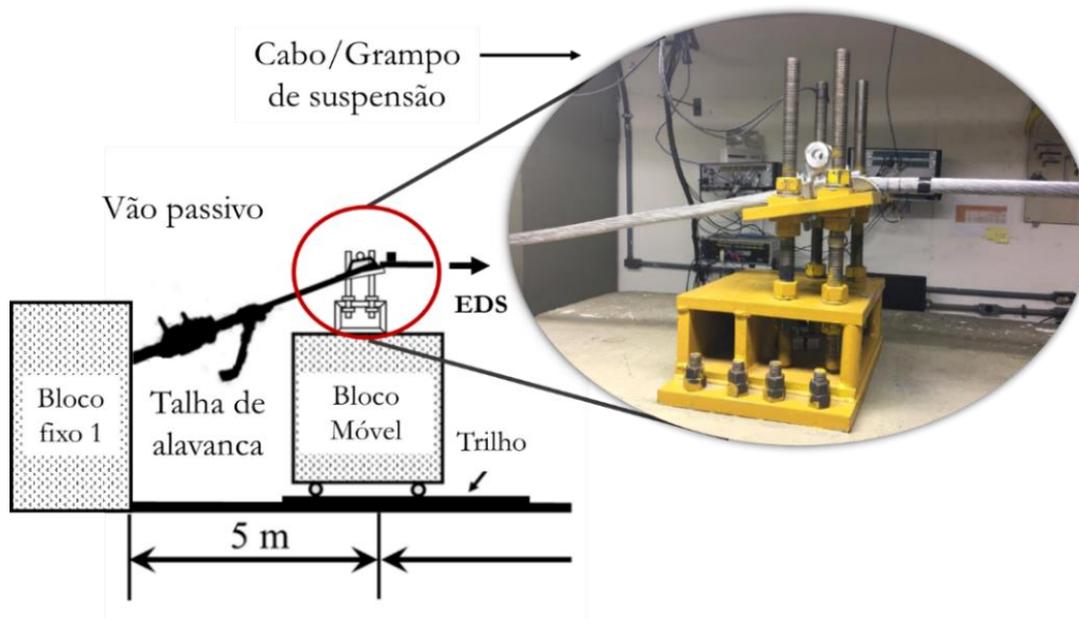


Figura 3-4 – Detalhe do local onde será acoplado o sistema de aquecimento

Após a etapa de pesquisa sobre qual o melhor sistema de aquecimento a ser implementado, optou-se pelo aquecimento resistivo, por se tratar de uma temperatura relativamente baixa se comparada com a maioria dos fornos e aquecimento industrial. O controle para sistemas resistivos é mais simples de ser controlado, pois não há defasagem entre tensão e corrente, e a potência possui máxima transferência de trabalho. Tal implementação tornar-se-ia mais complexa se fosse implementado o sistema de aquecimento indutivo.

Para desenvolver o sistema de aquecimento, optou-se pelo método de aquecimento por resistência indireta, onde a corrente passará pelos elementos de aquecimento por radiação infravermelha em cerâmica, e produzirá energia calorífica, proporcionando o aquecimento do conjunto cabo/grampo. Este método é o mais utilizado em vários tipos de fornos de resistências industriais, é também utilizado em tratamento térmico de metais, estufa de secagem e aquecimentos abertos.

3.3.2 Modelagem computacional do suporte para o conjunto de aquecimento

A etapa de solução para implementação do suporte para a instalação das resistências, consistiu no desenvolvimento de cabine aberta de aquecimento foi desenvolvido o modelo

computacional tridimensional do suporte para a bancada A, onde é ancorado o cabo e grampo para realização dos ensaios em temperatura ambiente. Assim, foi possível ter uma visão mais segura das dimensões do conjunto a ser projetado para realizar o aquecimento direcionado. Uma vez que o desenho 3D dá uma visão geral de cada detalhe do que será projetado, fica mais segura a execução posterior do projeto.

A etapa de modelagem foi importante no quesito de construção do protótipo de forma mais eficiente e com menor custo, haja vista que o investimento ficou em função do tempo para se produzir os modelos. Após a etapa de dimensionamento da estrutura no protótipo virtual, com os devidos ajustes realizados no desenho a fim de verificar o posicionamento adequado do conjunto de resistências de aquecimento, foi-se para a etapa de confecção da estrutura para o acondicionamento das resistências dentro da caixa projetada.

A figura 3.5 mostra o modelo 3D do conjunto e onde será instalado (figura 3.5 a) o sistema de aquecimento, juntamente com a projeção 3D do sistema de aquecimento com as resistências posicionadas (figura 3.5 b). Foram colocados os três elementos de aquecimento por radiação infravermelho em cerâmica.

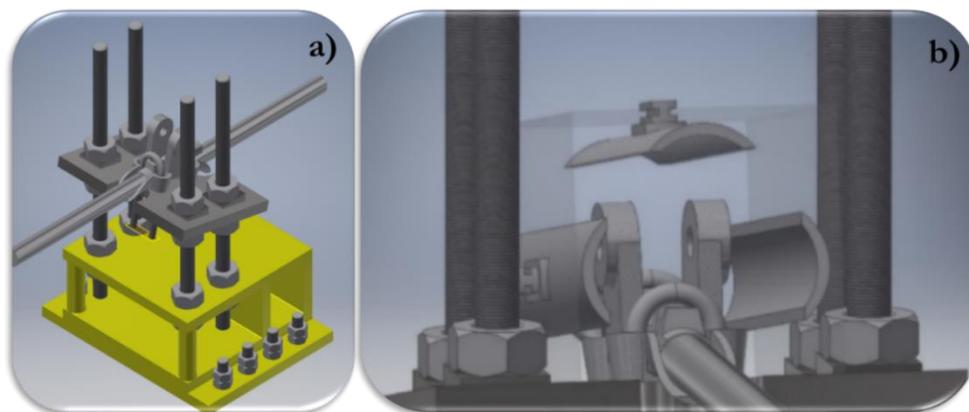


Figura 3-5 – Modelo 3D do suporte para o grampo de suspensão a) e posicionamento das resistências b).

É possível observar a perspectiva do suporte para fixação do conjunto de aquecimento na figura 3.6 juntamente com vista frontal 3.6 a) e lateral 3.6 b).

Nesta etapa pode ser concebida a prévia do conjunto completo do sistema de aquecimento, antes de sua construção física, usando a modelagem 3D. Assim foi possível verificar o resultado do conjunto já acoplado ao equipamento de suporte para o grampo de suspensão.

O suporte foi desenhado de acordo com as especificações da bancada A, de modo a ser posicionado o mais próximo possível do conjunto cabo e grampo a ser aquecido. Optou-se por

fazer o suporte de chapa de alumínio, por proporcionar leveza, acabamento e facilidade na confecção da peça.

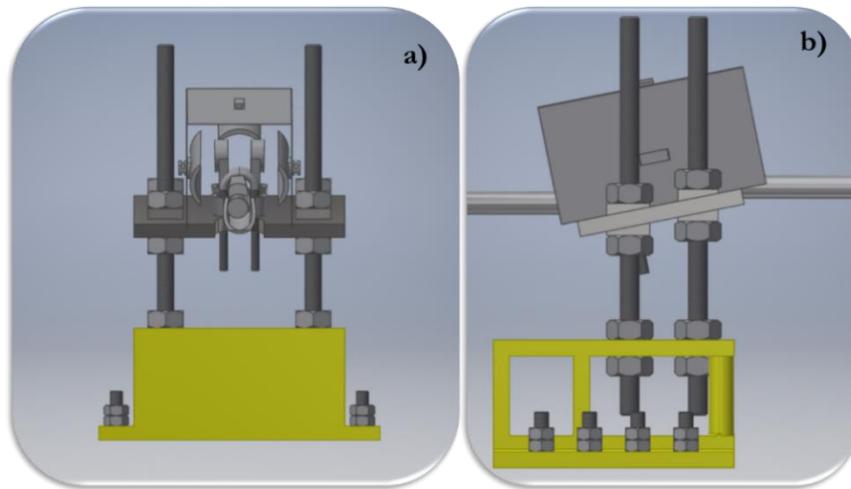


Figura 3-6 - Vista frontal a) e lateral b) do sistema acoplado ao equipamento de suporte

3.3.3 Elementos de aquecimento por radiação infravermelha em cerâmica

O sistema desenvolvido é baseado em um aquecimento resistivo, pois o aquecimento indutivo mostrou-se instável para controle de temperaturas abaixo de 300 °C, sendo assim, optou-se por trabalhar com elementos de aquecimento por radiação infravermelha em cerâmica, conforme foto mostrada na figura 3.7. Os elementos de aquecimento por radiação infravermelha em cerâmica, embora frágeis, oferecem uma melhor performance no gradiente de aquecimento e na inércia térmica, com aquecimento rápido e eficiente, para solução do problema proposto. Dentre as vantagens do uso desta tecnologia de aquecimento pode-se citar: i) Emissores de infravermelho transmitem o calor sem contato, ii) Tempos de reação curtos e alta capacidade de transmissão de calor, iii) Os emissores de infravermelho são adaptados com facilidade a aplicação de interesse, sendo possível dimensionar tamanho, comprimento de ondas, tensão de trabalho e potência iv) o aquecimento são mais rápidos e com alta eficiência o que proporciona economia de energia.

Os elementos são fabricados conforme a norma IEC 60335-1, em porcelana aluminosa que tem alto poder de dispersão térmica através da radiação infravermelha é dotado de isolamento térmico em sua própria estrutura fazendo com que o calor seja dirigido apenas à face da radiação, o que aumenta o rendimento térmico e reduz o consumo de energia elétrica. Especificações técnicas dos elementos infravermelhos de cerâmicas usados são as seguintes: o

tamanho utilizado foi de $60\text{ mm} \times 245\text{ mm}$; o comprimento da onda de 4.0 a $10\text{ }\mu\text{m}$ (emissividade); tensão de trabalho 220 V AC , eficiência no aquecimento de 96% ; potência de 800 W o que pode proporcionar aquecimento de até 700° C , densidade máxima de potência: $60\text{ kW}/\text{m}^2$ conforme especificações do fabricante.

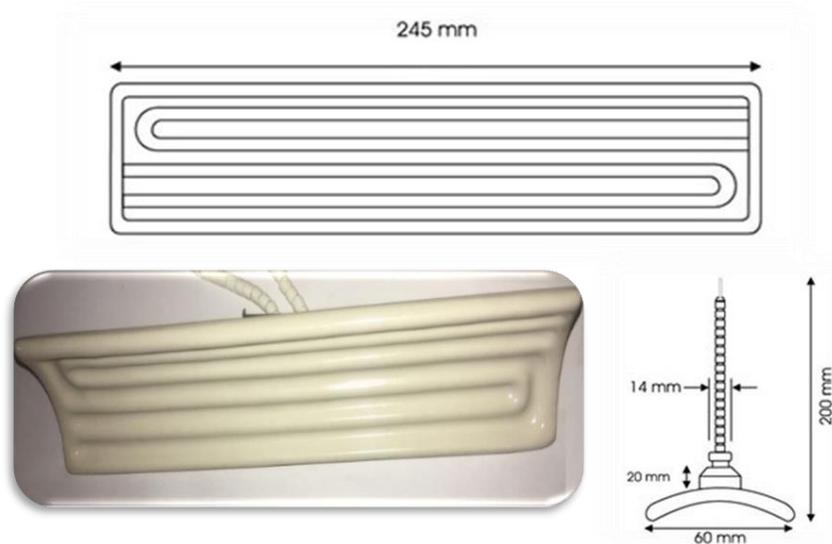


Figura 3-7 – Especificações do Elementos de aquecimento por radiação infravermelho em cerâmica.

O sistema de aquecimento por radiação infravermelho em cerâmica baseia-se no princípio básico de aquecimento de radiação direta. A energia infravermelha é a energia radiante que atravessa o espaço na forma de ondas eletromagnéticas, sendo pouca parte absorvida pelo ar. Assim, proporciona uma transferência de calor eficiente, e sem contato direto entre a fonte de calor e o conjunto de interesse a ser aquecido.

A radiação se dará pela propagação das ondas eletromagnéticas emitidas pelos elementos, e as ondas caloríficas que serão propagadas no ar em forma de energia térmica, a qual será absorvida pelo conjunto cabo/grampo, aumentando assim a temperatura. O aquecimento acontece apenas no local direcionado e não no ar como o aquecimento convencional.

3.3.4 Controlador Promocional Integral Derivativo (PID)

Para a solução de desenvolvimento do controle do sistema de aquecimento optou-se pelo uso de um sistema embarcado controlador PID de temperatura, por ser de fácil aquisição, baixo custo e de fácil controle. Possui display universal, no qual é realizado o controle da temperatura digitalmente. É programável e suporta os mais variados tipos de sensores, como os termopares e termorresistências do tipo $PT100$, basta realizar a devida programação para tal. A alimentação

elétrica é da rede convencional 220 V AC, pois internamente possui conversores e rebaixadores de tensão. O módulo embarcado pode ser visualizado na figura 3.8 a) foto da vista frontal e 3.8 b) as especificações de dimensões para ser embutido no painel de controle.

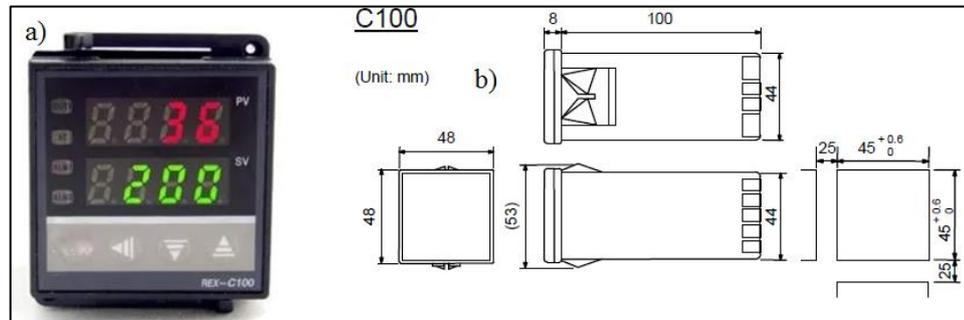


Figura 3-8- a) vista frontal do módulo e b) dimensões

O módulo PID embarcado possui a função *Auto Tuning* que é capaz de calcular automaticamente os valores dos três parâmetros de ganhos do controlador PID: K_p , K_i e K_d proporcionando os ganhos, garantindo mais eficiência no controle de temperatura. Entretanto, há a possibilidade de os parâmetros serem calculados e inseridos manualmente.

3.3.5 Sistema de Controle e Aquecimento

Nesta seção serão discorridas as informações e passos seguidos para a construção do sistema de controle de aquecimento.

3.3.5.1 Sistema Do Controlador

O sistema desenvolvido, consiste em um controle de *feedback* convencional PID / SISO³, um controlador é um mecanismo que controla a saída de um sistema ajustando sua entrada de controle. O sistema é baseado em malha fechada, que mede continuamente a saída, compara-a com a saída desejada (*set-point*) e ajusta a entrada dependendo do erro calculado.

A formulação PID é uma solução amplamente utilizada na indústria por apresentar boa confiabilidade e aplicação prática relativamente simples, razão pela qual optou-se por utilizar este tipo de controle no desenvolvimento do controle para o aquecimento. Na figura 3.9 pode ser visualizado o esquema elétrico das ligações do sistema, com alimentação direta na rede será ligado na rede de alimentação monofásica 220Vrms, pois a corrente de trabalho exigida pelo

³ Sistema com uma entrada e uma saída

o sistema não ultrapassa a requerida por um chuveiro elétrico convencional. O equipamento será ligado na rede elétrica do laboratório, não exigindo assim instalação dedicada para o propósito dos ensaios.

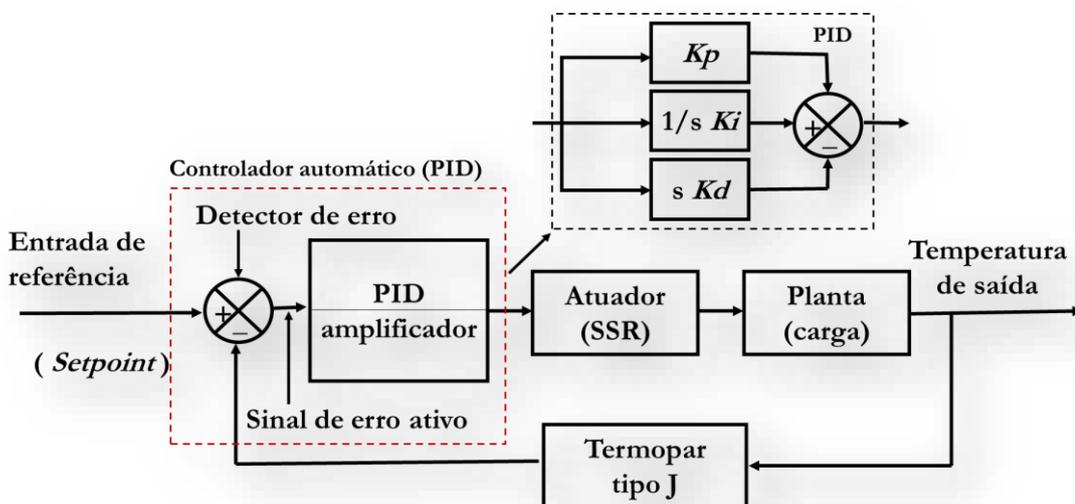


Figura 3-9 - Diagrama esquemático do sistema de malha fechada

Pode-se observar que no esquema elétrico (figura 3.10) o sistema possui dois fusíveis. O fusível 1 é para a proteção do sistema de acionamento da carga, que é composto por um fusível ultrarrápido de 30 A responsável pelo acionamento do conjunto de resistência infravermelho. A carga será acionada por um relé de estado sólido (SSR). O fusível 2 é do tipo comum, de três ampères, responsável pela proteção do módulo embarcado PID do controlador.

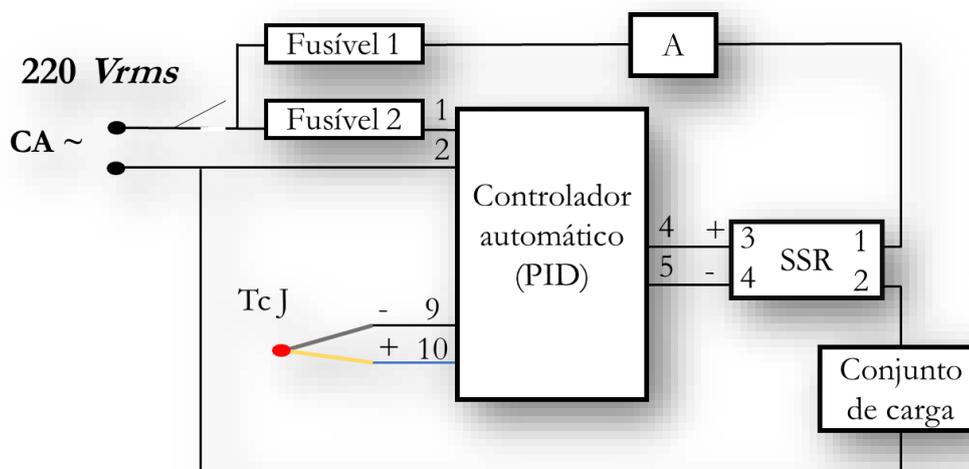


Figura 3-10 - Esquema elétrico do sistema de aquecimento controlado

3.3.6 Cálculo da Potência Requerida pela Planta

Nesta seção serão detalhados os cálculos necessários para a projeção do conjunto de resistências do aquecimento indireto aberto. No sistema aberto é possível fazer a inspeção visual, que era um dos desafios do projeto, uma vez que nos ensaios este modelo era requerido, pois haveria a necessidade de fazer a verificação das linhas de quebras, as quais é possível verificar visualmente as quebras externas dos fios.

3.3.6.1 Dimensionamento Da Potência Necessária Para O Sistema

Apesar do cabo condutor para realizar o ensaio medir 46 metros, a amostra é a região que será aquecida e é relativamente pequena. Assim, para efeito de cálculo da carga térmica necessária para aquecer e manter aquecida a região do conjunto do cabo/grampo, será considerado um volume de controle (V.C) que contém o grampo e um comprimento de meio metro de cabo. Dessa forma, definindo o V.C. da amostra, conforme ilustrado na figura 3.11.

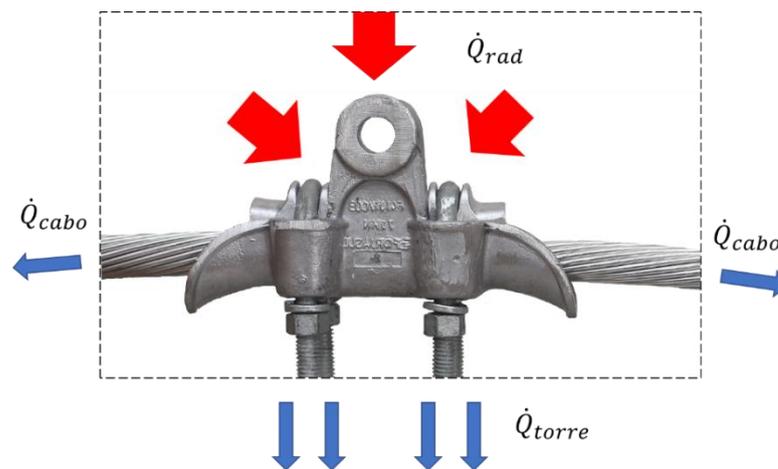


Figura 3-11 – Representação das condições de troca térmica na amostra (conjunto cabo/grampo)

Embora não seja objeto de análise deste trabalho é possível quantizar a energia necessária para o aquecimento da amostra. Estes cálculos são uma estimativa, haja vista, que o sistema aberto requer cálculos com modelagens complexas e mais completas para o balanço das taxas de energia que cruzam as fronteiras do V.C. Assim, de uma forma simplificada os mecanismos de troca térmica envolvidos nesse sistema físico serão representados pela equação 3-1;

$$\frac{dU}{dt} = \dot{Q}_{rad} - \dot{Q}_{cabo} - \dot{Q}_{torre} \quad (3-1)$$

onde:

$\frac{dU}{dt} \equiv$ taxa de variação da energia interna do V.C.,

$\dot{Q}_{rad} \equiv$ fluxo de calor produzido pelo sistema de aquecimento e que entra no V.C.,

$\dot{Q}_{cabo} \equiv$ fluxo de calor que é transferido do V.C. para o ambiente pelo cabo condutor,

$\dot{Q}_{torre} \equiv$ fluxo de calor que é transferido do V.C. para o ambiente pelo sistema de fixação do grampo de suspensão,

3.3.6.2 Estimativa da Taxa de Variação da Energia Interna no Volume de Controle

Nessa situação específica, a variação da energia interna na amostra deve-se basicamente a variação do calor sensível do alumínio usado na fabricação do grampo e do cabo. Dessa forma, a variação da energia interna pode ser calculada por meio da equação 3-2.

$$\Delta U = m \cdot c \cdot \Delta T \quad (3-2)$$

onde m é a massa de alumínio, c é o calor específico ($c_{al} = 920 \frac{Joule}{Kg \cdot ^\circ C}$) e ΔT é a variação da temperatura.

Para a estimativa da massa de alumínio foi considerado apenas meio metro do cabo e o grampo de suspensão. Sabendo que a massa linear do cabo, representada no quadro 3.1, é da ordem de $888,44 \frac{kg}{km}$, conclui-se que para meio metro de cabo, considerando-o isolado do restante do cabo de ensaio e considerando-se apenas a amostra, tem-se;

$$m_{cabo} = 888,44 \frac{kg}{km} \times 0,50 m = 444,22 g \quad 3-3$$

Já a massa do grampo pode ser obtida das informações disponíveis na figura 3.4. Assim, tem-se uma massa total do conjunto de;

$$m_{total} = m_{cabo} + m_{grampo} = 444,22 g + 1280 g = 1724,22 g \quad 3-4$$

Após o cálculo da massa total, faz-se a quantização da energia necessária para variar a temperatura e aquecer o conjunto cabo/grampo, ou seja, o calor sensível obtido através da equação 3.5, considerando-se o valor do calor específico em $J/kg \cdot K$ e a temperatura em K . Considerando o valor da temperatura máxima de aquecimento de $150^\circ C$, tem-se o gradiente de temperatura para elevar a massa total de $20^\circ C$ a $150^\circ C$ igual

$$Q = 1724,22 \text{ g} \times \frac{9,2 \cdot 10^2 \text{ J}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \times (130 \text{ K}) \cong 206,21 \text{ kJ} \quad 3-5$$

Desses resultados será possível realizar os cálculos da potência necessária para o aquecimento do conjunto considerando a temperatura máxima de trabalho de 75°C . De acordo com os cálculos, considerando uma potência líquida necessária para produzir o gradiente de temperatura máxima desejado, desconsiderando as perdas do ambiente. Proporcionando aquecimento em um intervalo de tempo de 180 segundos. Sendo as condições de contorno, desprezando-se as perdas de calor para o ambiente, a partir da equação 3-6.

$$P = \frac{Q}{\Delta t} = \frac{206,21 \text{ kJ}}{180 \text{ s}} = 1,14 \text{ kW} \quad 3.6$$

Considerando o trabalho na potência máxima será necessário $\cong 1,2 \text{ kW}$, lembrando que as perdas de energia acontecem pela dissipação direta para o ambiente, entretanto a eficiência do sistema é de até 96%, isto proporciona perdas de menores que 5%.

3.3.6.3 Sistema De Aquecimento Resistivo

Será utilizado no sistema de aquecimento três elementos de aquecimento por radiação infravermelho em cerâmica, com resistências elétricas de 60Ω , ligadas em paralelo, conforme figura 3.12, sendo a resistência total do circuito resistivo de 20Ω . Cada elemento resistivo fornece uma potência de 800W , então para o arranjo soma-se uma potência total de $2,4 \text{ kW}$, que é a potência fornecida pelo sistema na corrente máxima.

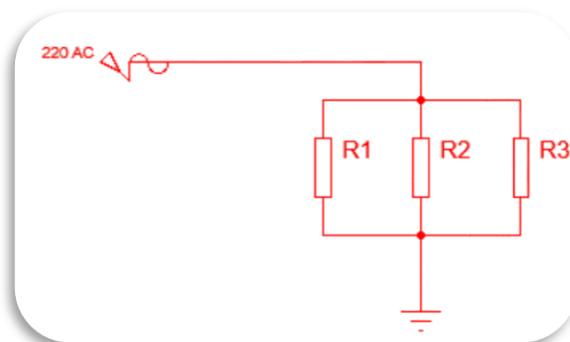


Figura 3-12 - esquema do circuito resistivo

A corrente requerida pelo sistema em uma alimentação de 220 V_{rms} , tendo uma amplitude de tensão senoidal de $v(t) 311 \text{ sen}(2\pi f t)$. Considerando que em circuito puramente resistivo, tem-se a tensão e a corrente em fase. Pela lei de Ohm complexa, pode-se calcular a

corrente máxima requerida pelo sistema resistivo aplicando a lei de ohm $v(t) = R i(t)$ então o sistema demandará uma corrente de:

$$i(t) \cong \frac{311 \text{ sen}(2\pi ft)}{20 \Omega} \cong 15,55 \text{ sen}(2\pi ft) \quad 3-7$$

Como o sistema é puramente resistivo, quando se aplica uma tensão $v(t) V_{max} \text{ sen } \omega t$ tem se uma corrente eficaz de ($I_{rms} = 10,99 \text{ A}$) e a potência pode ser calculada pela equação fundamental que corresponde a

$$p(t) = v(t) i(t) = V_m I_m \text{ sen}^2 \omega t \quad 3-8$$

como;

$$\text{sen}^2 x = \frac{1}{2} (1 - \cos 2x) \quad 3-9$$

tem se a potência o produto da tensão e corrente, assim

$$p(t) = \frac{1}{2} V_m I_m (1 - \cos 2(2\pi ft)) = V I \cos \phi, \quad 3-10$$

onde ϕ é o ângulo entre tensão e corrente, e estará sempre entre $+90^\circ$ e -90° . No caso do sistema resistivo, o ângulo estará sempre em fase e pode-se calcular a potência aparente, usando os valores eficazes (*rms*) de V e I respectivamente. Sendo;

$$V = \frac{V_m}{\sqrt{2}} \text{ e } I = \frac{I_m}{\sqrt{2}} \quad 3-11$$

Assim, a potência aparente do sistema será igual a potência real, por se tratar de circuito resistivo é será aproximadamente;

$$p(t) = \frac{311}{\sqrt{2}} \times \frac{15,55}{\sqrt{2}} \cong 2.42 \text{ kW} \quad 3-12$$

Estes valores foram conferidos experimentalmente, durante o acionamento do sistema a corrente *I_{rms}* chega a 10,8 A, caindo para 10,3 A, vale ressaltar, que o sistema só trabalha na corrente máxima durante a rampa de aquecimento (180s), após isso o sistema drena somente a corrente necessária para manter o aquecimento de *setpoint*.

3.3.7 Implementação do Sistema de Aquecimento Controlado

Todos os componentes do equipamento experimental de controle para realizar o aquecimento e controle do conjunto de elementos de aquecimento foi montado em uma caixa de plástico para garantir a proteção e isolamento dos componentes. A temperatura desejada de

ensaio pode ser inserida direto no display do controlador. O manual de uso está sendo detalhado no APÊNDICE A. Na figura 3.13, pode-se visualizar o sistema já montado e no detalhe a foto 3.12 a) é apresentada a visão interna do acondicionamento dos componentes. Na figura 3.12 b) a entrada de alimentação CA 220 V, e as saídas do termopar e cabo de energia elétrica do sistema de aquecimento, conforme fotos.

Após a montagem da caixa de controle e do conjunto de aquecimento, foram realizados alguns testes para verificar o funcionamento do equipamento. No primeiro momento não foi utilizado isolamento térmico no suporte das resistências.

Em todos os ensaios, tanto a temperatura de *setpoint* quanto a temperatura aferida pelo termômetro digital, ambas marcaram iguais com erros inferiores a 2%, o que sinalizou o perfeito funcionamento do equipamento desenvolvido. O teste inicial foi realizado em temperatura ambiente de 22 °C, com o conjunto cabo grampo fixado em atmosfera aberta. O equipamento ficou funcionando sem oscilação de temperatura enquanto esteve em teste.

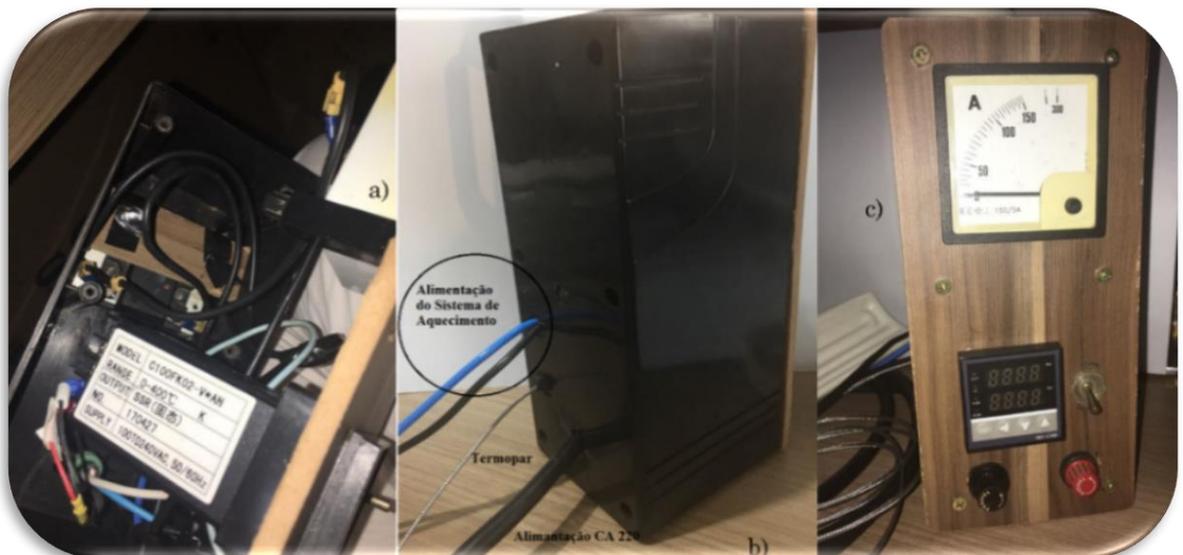


Figura 3-13 - foto do controlador, a) visão interna, b) visão das saídas, e c) visão frontal

3.3.7.1 Resposta Temporal De Aquecimento Do Sistema

Neste item analisar-se-á o desempenho do controlador PID que foi implementado para realizar o aquecimento e controle de temperatura, com parâmetros auto sintonizados, ou seja, sintonia automática. Para fazer a comparação do tempo de aquecimento e verificar o comportamento do regime transitório do sistema, a fim de validar o equipamento experimental foram realizadas avaliações para três temperaturas, 75°C, 100°C e 150°C. A verificação para

o comportamento do funcionamento constante em regime permanente, foram realizadas na temperatura de 75°C , que foi a temperatura dos ensaios deste trabalho.

A resposta do sistema para o caso de o controlador atingir a temperatura de 75°C . Analisando as respostas verificou-se que o desempenho do controlador em relação ao tempo de subida, que é mostrado na figura 3.14 atingiu o *set point* em menos de 156 segundos (2 minutos e sessenta segundos).

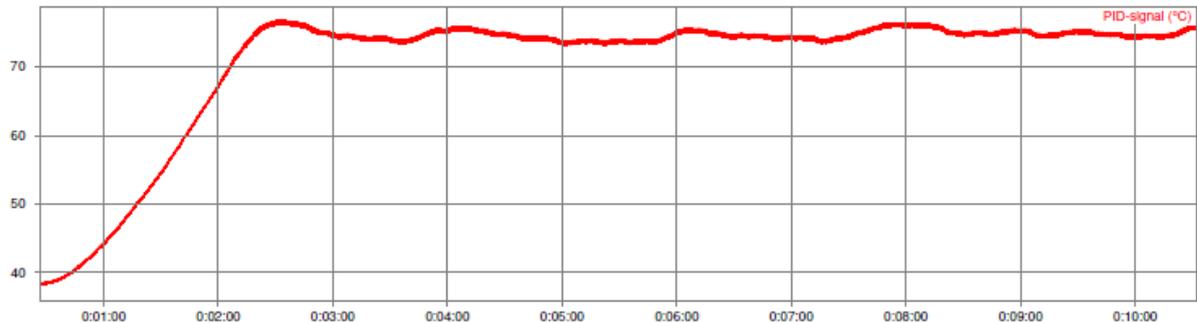


Figura 3-14 – Saída da temperatura medida no cabo, *setpoint* de 75°C atingido em 156 segundos

Na figura 3.15 apresenta o comportamento para os testes em 100°C , e atingiu o *set point* para a temperatura de 100°C em menos de 195 segundos (3 minutos e vinte e cinco segundos). E na figura 3.16 apresenta o comportamento para os testes em 150°C e atingiu o *set point* para a temperatura de 150°C em menos de 381 segundos (6 minutos e trinta e cinco segundos).

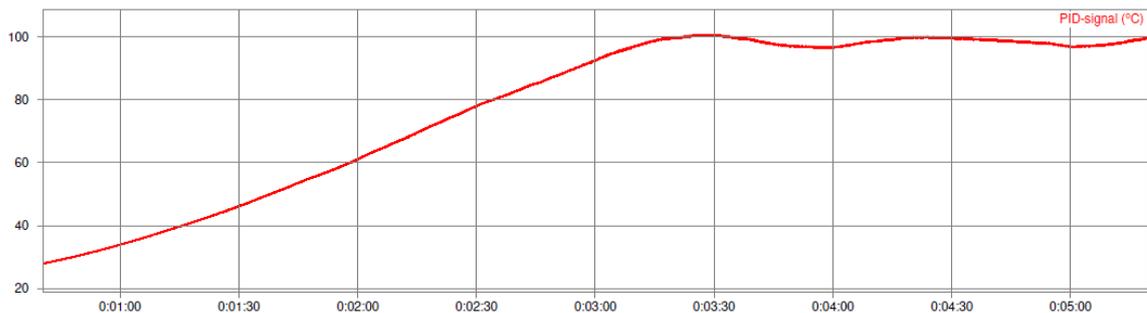


Figura 3-15 – Saída da temperatura medida no cabo, *setpoint* de 100°C atingido em 195 segundos

O que se observou é que para temperaturas acima de cem graus, o intervalo de tempo de resposta transitória da subida foi superior quando comparado com a temperatura de 75°C , esta condição pode ser corrigida com a substituição dos elementos de aquecimentos por peças mais largas, que fará uma uniformização e concentração do aquecimento localizado, proporcionando respostas mais rápidas. Os resultados obtidos na implementação do sistema de controle de

temperatura mostraram-se satisfatórios do ponto de vista de estabilidade e regulação. Em todos os ensaios realizados foi observado que a temperatura de 75°C era alcançada em menos de 3 minutos, após cinco minutos do regime transitório de estabilização os ensaios foram iniciados.

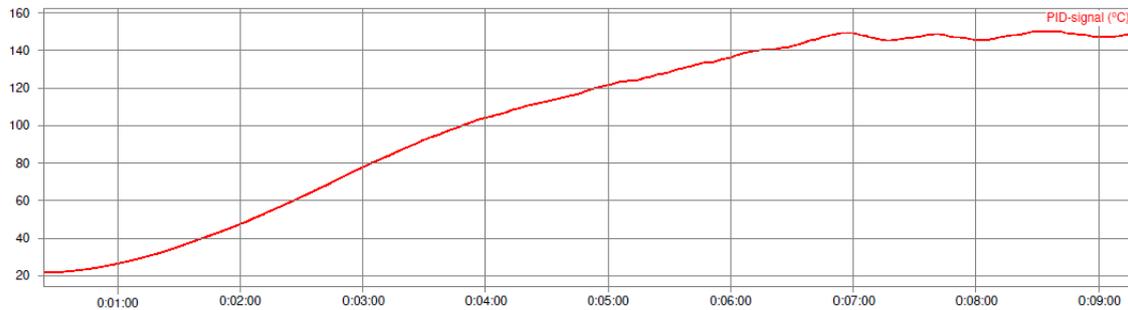


Figura 3-16 – Saída da temperatura medida no cabo, *setpoint* de 105°C atingido em 381 segundos

3.3.7.2 Resposta De Regime Permanente Do Sistema De Aquecimento

Os testes iniciais apontam que o equipamento apresenta funcionamento satisfatório durante o regime transitório de aquecimento, e que atendeu a primeira etapa dos objetivos propostos para realizar a parte experimental dos ensaios. O monitoramento da temperatura ambiente do laboratório será realizado com um termômetro digital auxiliar.

Nos testes para verificação da concentração de calor dentro da cabine de aquecimento foi medida a irradiação térmica com câmera termográfica para verificar a concentração de calor na amostra. Para os resultados apresentados nas próximas seções, as temperaturas foram coletadas usando uma câmera infravermelho, fabricada pela Fluke Corporation, modelo: ($T_i - 10$); Precisão $\pm 5^{\circ}\text{C}$. Temperatura de Operação (-10°C a 50°C). Unidade Relativa 10% a 90% sem condensação, visor de *LCD* a cores 640x480, diretiva CE IEC/EM 61010-1, frequência de imagem com taxa de utilização de 9Hz .

Na foto da figura 3.17 a) pode-se perceber que o calor se concentra exatamente no conjunto de interesse, ou seja, no cabo/grampo e em uma pequena parte do cabo fora da cabine. A temperatura no interior da cabine acima do cabo chega a ficar em torno de 130°C , mas no último ponto de contato se mantém a 75°C , conforme o *setpoint* do controlador. Na figura 3.17 b) o mesmo ponto sem a irradiação térmica.

As condições climáticas do laboratório se mantiveram abaixo dos 21°C , o que favorece o resfriamento ao longo do cabo, pois o aquecimento pode provocar dilatação térmica e

alongamento da amostra, mudando assim a tensão inicial fixada. Foram verificadas duas situações para o sistema de aquecimento; a primeira foi manter a cabine de aquecimento fechada com isolamento térmico de lã de vidro, na frente e atrás, a segunda, manteve a cabine aberta. Apesar de ter maior perda energética com a cabine aberta, a segunda opção mostrou-se a mais favorável, pois quando a cabine está fechada a propagação de calor no cabo se intensificou, o que pode provocar dilatação térmica. Com a cabine aberta, o cabo próximo ao conjunto de aquecimento fica mais frio e o calor fica concentrado apenas no interior da cabine, conforme ilustrado na foto da figura 3.17, desta forma, a irradiação térmica, fica mais concentrada no conjunto de interesse no seu interior. A foto da figura 3.18 apresenta a cabine de aquecimento já finalizada em operação.

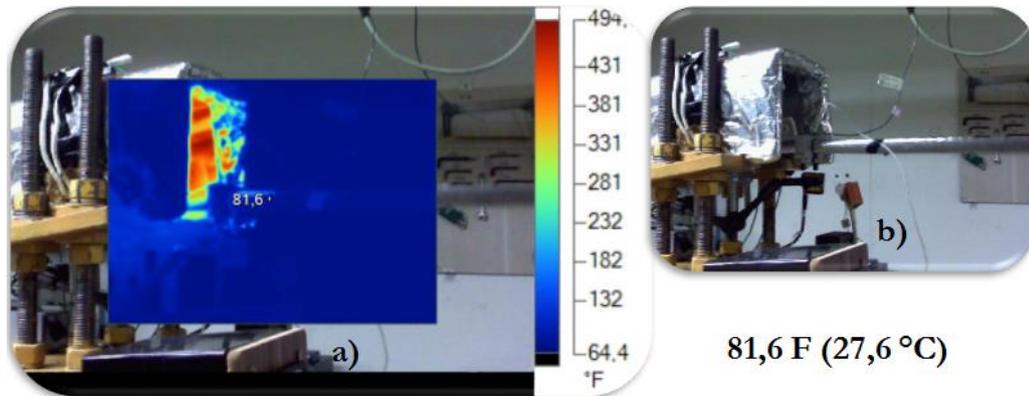


Figura 3-17 - Irradiação térmica de superfície



Figura 3-18 – Cabine de aquecimento finalizada

3.3.8 Testes do equipamento de aquecimento controlado.

Todos os ensaios tiveram o monitoramento digital da temperatura usando termopar tipo J, ultrasensível. Este procedimento se fez necessário para minimizar o erro de incertezas nas medidas da temperatura e da temperatura de *setpoint* do controlador.

O termopar foi instalado no ponto simétrico oposto ao último ponto de contato do cabo de ensaio e os dados foram obtidos usando o aquisitor de dados disponível no laboratório GFFM. Entretanto, para fazer a validação do equipamento fez-se a inspeção fotográfica periodicamente de seis em seis horas. Este procedimento foi para verificar o comportamento da temperatura em ensaios duradouros, com mais de 48 horas, a fim de elaborar as curvas de temperatura, para verificar se ela se manteve constante ao longo dos ensaios.

As temperaturas foram registradas com a escala Graus Fahrenheit ($^{\circ}F$) sendo necessário fazer a conversão para as escalas Graus Celsius ($^{\circ}C$) e Kelvin (K). Dito isto, serão apresentadas de forma tabular as temperaturas medidas durante cada ensaio, onde foram calculadas as médias aferidas de sete ensaios, monitorados durante todo o tempo em intervalos de até sete horas.

As medidas foram aferidas sempre nos mesmos pontos de referências, aos quais eram importantes de serem verificados, devido a tensão de trabalho dos sensores. Foi o caso do laser no ponto $89mm$, usado no conjunto de detecção de quebras durante o ensaio. A sua temperatura de trabalho foi preservada, pois em todos os ensaios a temperatura não ultrapassou $40^{\circ}C$, conforme foi exposto. Outra preocupação era o acelerômetro no ponto $89 mm$, por ficar bem próximo a cabine de aquecimento. Assim, em todas as aferições realizadas foram verificadas sua temperatura, que também se manteve abaixo dos $40^{\circ}C$, preservando a faixa de temperatura de trabalho do transdutor.

As posições das quais as temperaturas foram medidas podem ser verificadas pelas fotos apresentadas a seguir elas apresentam as tomadas de temperaturas realizadas com a câmera infravermelho. Um ponto importante a ser verificada durante o ensaio era o último ponto de contato (UPC) do cabo de ensaio (CE) com o grampo, a fim de analisar a eficiência do equipamento em manter a temperatura constante ao longo de cada ensaio, este ponto é onde ocorre o fenômeno de quebras dos fios no cabo de ensaio, desta forma a concentração da temperatura neste ponto deve ser estável, para que seja realizado o estudo. As figuras 3.19 a) e 3.19 b), a foto da figura 3.19 a), pode ser observado as temperaturas que foram medidas no UPC registra uma temperatura de $172,6^{\circ}F$, o que representa em Celsius, uma temperatura de

78,11 °C, que foi a temperatura máxima registrada neste ponto. Já na figura 3.20 b), o mesmo ponto em luz visível para a mesma imagem.

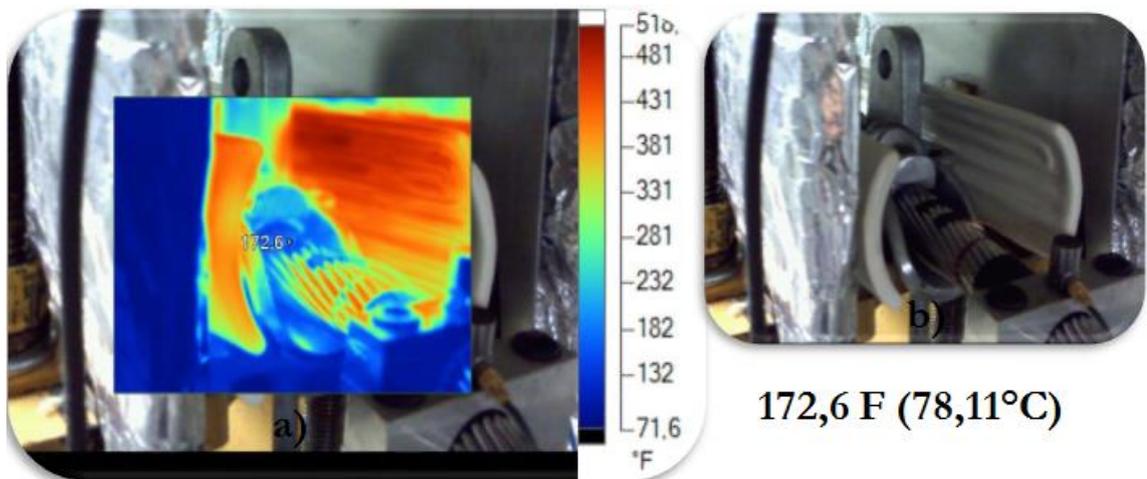


Figura 3-19 – Ponto de aferição de temperatura, lado oposto no UCP

A figura 3.20 a) é a foto com a temperatura infravermelha do ponto de aferição de temperatura no Laser de 98,0 °F o que corresponde a uma temperatura de 36,67 °C, e ao lado a escala delas. A figura 3.20 b) apresenta a imagem do local em luz visível. Os procedimentos de aferição foram repetidos durante os sete ensaios. Em todos os sete ensaios, nas aferições foram tiradas de três a cinco fotos termográficas de cada ponto, esses valores foram tabulados de modo a demonstrar a eficiência do equipamento em operação.

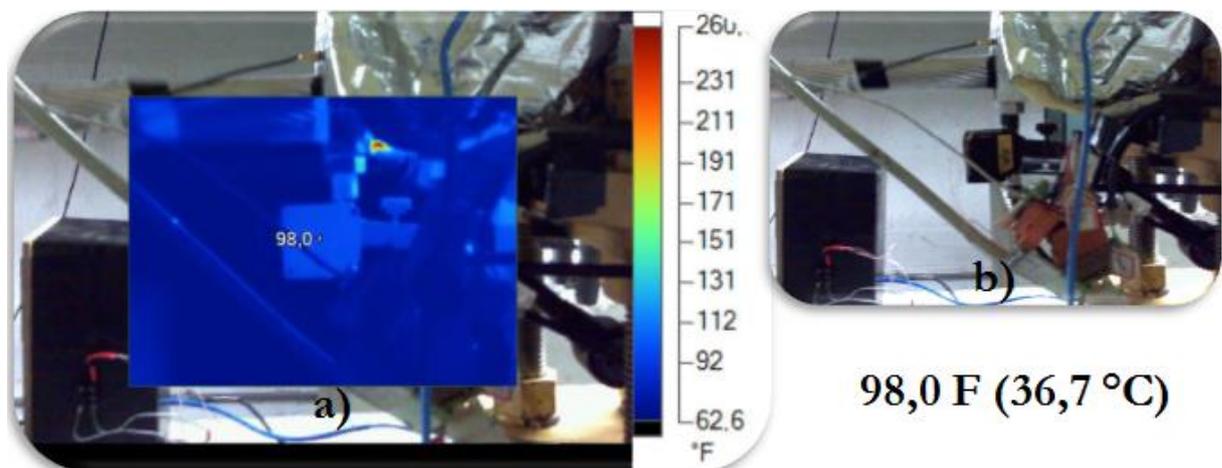


Figura 3-20 – Ponto de aferição de temperatura no Laser

A foto da figura 3.21 a) é apresentada a irradiação no ponto do acelerômetro em que foi aferida a temperatura de 96,4 °F, a média permeou em torno disso. Essa temperatura se manteve

estável durante os sete ensaios monitorados. Na foto apresenta a temperatura infravermelha e figura 3.21 b) ao lado apresenta imagem do acelerômetro em luz visível.

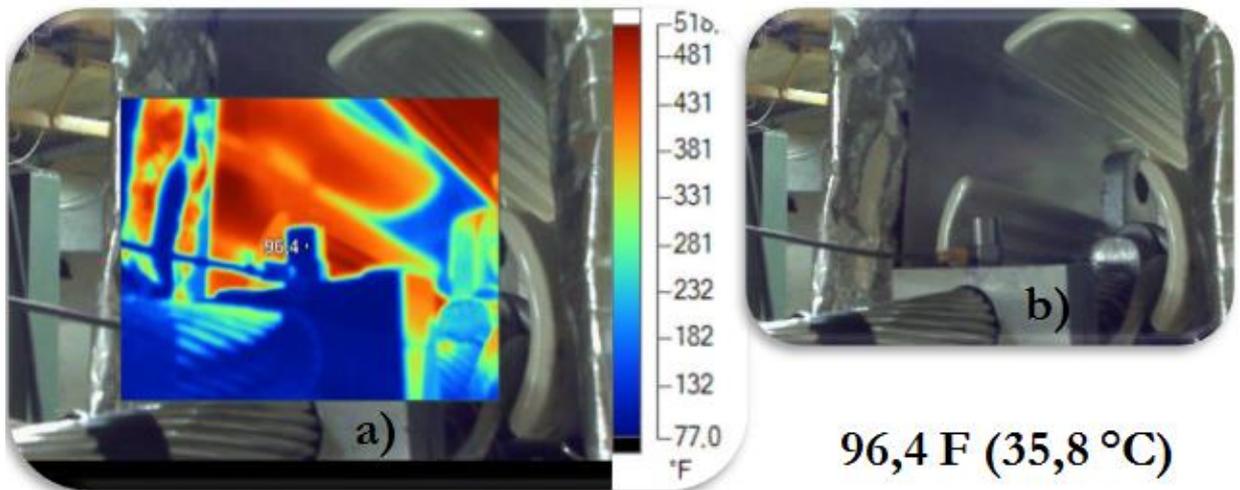


Figura 3-21 – Pontos de aferição de temperatura no Acelerômetro (Acc)

Foi verificada a propagação do calor ao longo do CE, as temperaturas foram aferidas em alguns pontos próximos a cabine de aquecimento e registrado a média. Como as temperaturas medidas eram parecidas e seus pontos simétricos em relação ao CE, apenas o ponto atrás da cabine de aquecimento foram tabulados. As fotos das figuras 3.22 a) e 3.22 b) mostram a irradiação no ponto em questão e a imagem de luz visível respectivamente.

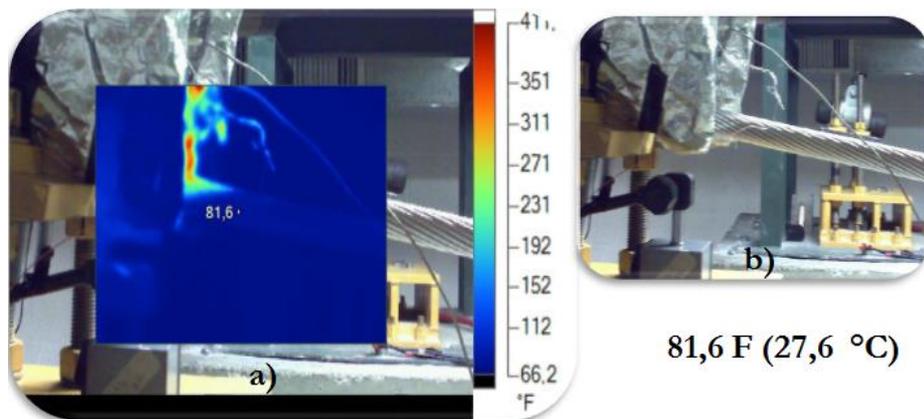


Figura 3-22 – Ponto de aferição de temperatura, CE atrás da Cabine de aquecimento

A temperatura em torno da cabine se manteve no máximo em 86,9 F, igual à 30,5 °C, uma das possíveis explicações para a temperatura se manter um pouco menor que a temperatura nos sensores da frente da cabine, era o fato do espaço ser aberto e não reter calor. Outra observação

feita durante os ensaios, é que a temperatura se manteve constante durante os monitoramentos. Foi observado também que a um metro de distância da cabine a temperatura era igual à temperatura ambiente do laboratório, e que os ensaios se mantiveram estáveis pois o aquecimento era mantido somente dentro da cabine de aquecimento, e em uma proximidade de 70 cm, já era percebido temperatura ambiente no CE.

Sendo assim, a cada inspeção eram verificados alguns outros parâmetros além da aferição da temperatura, e foi repetido a cada momento da inspeção. Os pontos verificados foram; a) fotos dos pontos, conforme supracitados, com a câmera infravermelho; b) fotos das linhas de verificação das quebras externas; c) quantidade de ciclos contados pelo programa TFC; d) ângulo indicador de quebras monitorados pelo TFC; e) frequência de ensaio e Y_b mostrado pelo programa *Shake Control* responsável pelo controle do ensaio; f) carga de esticamento do CE.

O uso dessa técnica de monitoramento foi importante, pois permitiu medir a temperatura dos sensores utilizados próximos à câmera de aquecimento (como o sensor a laser, acelerômetro e *strain gauges*) e verificar se estavam operando em suas respectivas faixas de temperatura de trabalho. Para os pontos de temperatura monitorados durante os ensaios e a média para cada ponto, foram tabuladas, e são disponibilizadas no APÊNDICE B. A partir das tabelas descritas no apêndice foi gerada uma tabela única em temperatura já calculada em Celsius, conforme pode ser visto na tabela 3.1, que apresenta a média dos pontos aferidos dos ensaios.

Comportamento da temperatura em °C, durante os ensaios
Tabela 3.1 – Comportamento da temperatura em °C, durante os ensaios

ENSAIOS	Pontos aferidos			
	UPC	Laser	Acc	Atrás da cabine
EN-01	77,6	32,4	34,1	30,3
EN-02	76,8	36,0	36,1	28,9
EN-03	77,2	36,2	36,9	32,5
EN-04	77,4	39,1	37,6	34,6
EN-05	76,5	37,1	38,5	31,4
EN-06	77,4	37,6	35,2	31,2
EN-07	77,4	36,6	38,3	31,1
Média	77,2	36,4	36,7	31,4
Std Dev.	0,4	2,1	1,6	1,8
C.V (%)	0,5	5,7	4,5	5,7

Analisando estes resultados, pode-se observar que a variação da temperatura média entre os testes é relativamente pequena (com coeficiente de variação, CV, de 0,5% no UPC, 4,5% na região do acelerômetro e 5,7% nas regiões atrás da câmara e onde o laser está. A fim de mostrar

o comportamento típico das temperaturas registradas durante os testes, na figura 3.2 apresenta o comportamento da média das temperaturas medidas na região UPC, para melhor compreensão dos resultados foi plotado na escala de Graus Celsius ($^{\circ}\text{C}$).

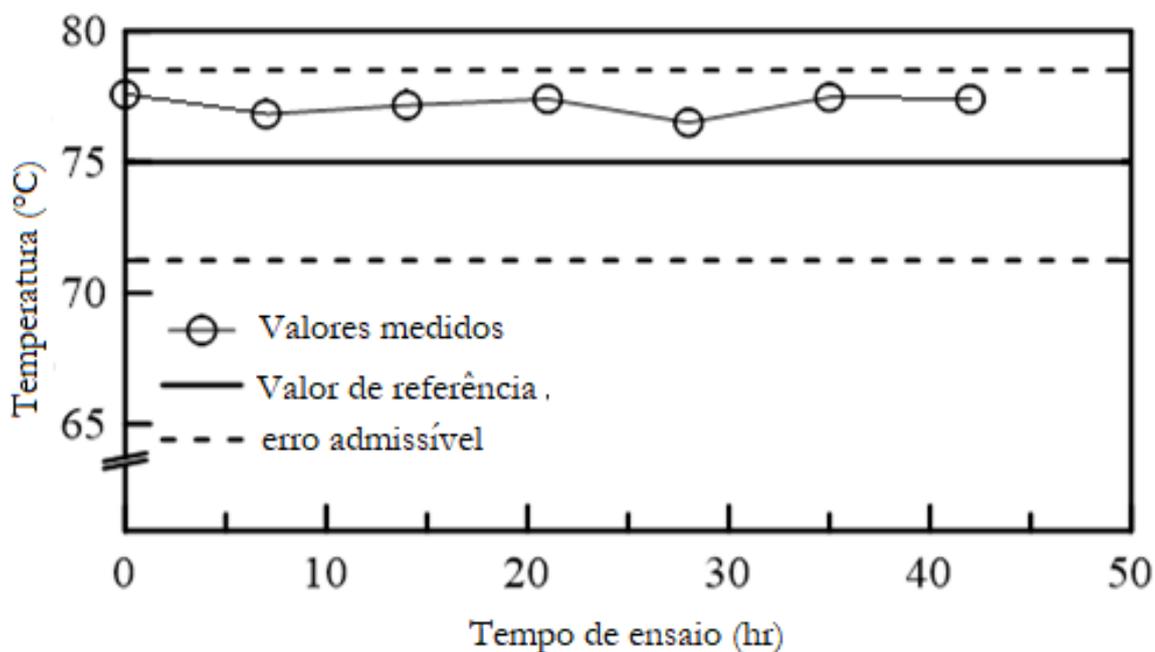


Figura 3-23 – Comportamento das temperaturas no UPC

Neste gráfico, a linha contínua representa o valor de temperatura de referência, isto é, a temperatura de *set point* dos ensaios (75°C), as linhas tracejadas representam os limites de erro admissível definido nas especificações do dispositivo de 5% da temperatura de referência. Finalmente, as marcas circulares representam as temperaturas medidas no UPC. A partir desses resultados, pode-se observar que no UPC, que é o ponto de interesse, a temperatura permaneceu em torno da temperatura de referência (valor médio de $77,2^{\circ}\text{C}$) e um coeficiente de variação de 0,51%. Isso indica que o equipamento está operando de acordo com as especificações do projeto, ou seja, níveis de exatidão e precisão de 5%. Assim, pode-se verificar que o sistema apresenta também um erro sistemático de $2,2^{\circ}\text{C}$ e coeficiente de variação de 0,51%.

Além disso, na figura 3.24 são apresentados os comportamentos das médias das temperaturas aferidas no acelerômetro (marcas triangulares), no laser (marcas circulares) e na região atrás da cabine (losangos). Da análise destes resultados pode ser garantido que os sensores estão trabalhando dentro da faixa de temperatura recomendada pelos fabricantes (acelerômetros $<120^{\circ}\text{C}$, laser $<45^{\circ}\text{C}$ e strain gauge $<100^{\circ}\text{C}$).

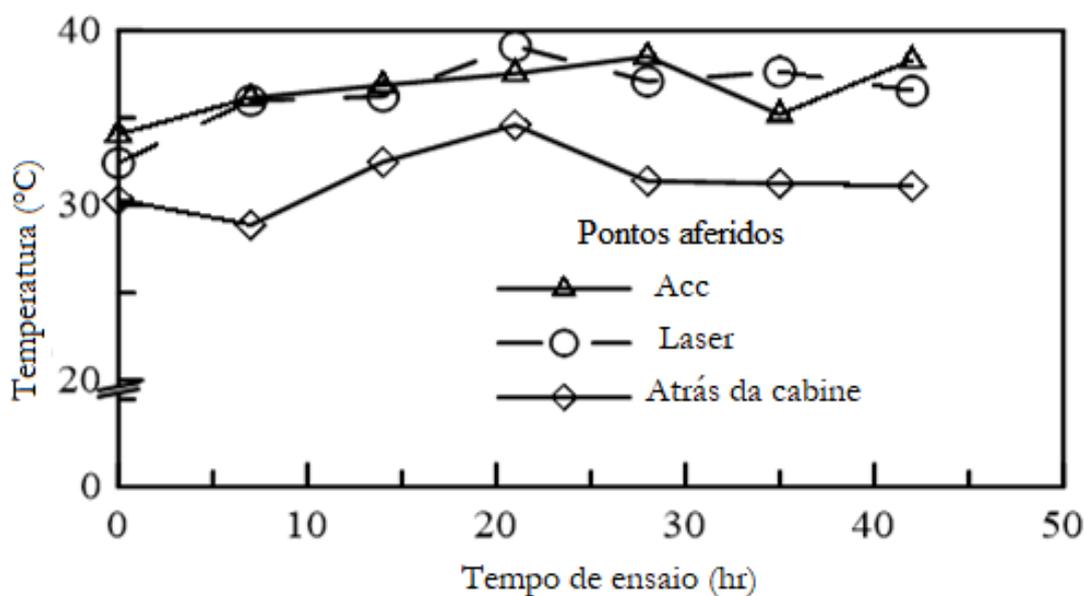


Figura 3-24 – Comportamento da temperatura nos pontos de aferição

3.4 PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS PARA EXECUÇÃO DOS ENSAIOS

Como citado anteriormente, o objetivo principal do presente projeto é o estudo da vida em fadiga através do método S-N, por meio de ensaios isotérmicos e fadiga, de modo que o comportamento mecânico do conjunto cabo grampo possa ser estudado em temperaturas acima da temperatura ambiente. Neste trabalho será estudado a temperatura de condições para cálculo da ampacidade de 75 °C, e sua resposta com comportamento de fadiga.

Para isso, é importante a padronização dos ensaios, de modo a evitar parâmetros aleatórios, que poderão influenciar e comprometer os resultados experimentais na determinação da vida em fadiga dos cabos. Desta forma, as mesmas condições em todos os testes serão mantidas. Todos os ensaios deste trabalho serão executados de acordo com as recomendações da CIGRE (1985), EPRI (2006) e IEEE (1966), (2008). Para gerar as curvas S-N, para cada temperatura, será adotado o critério de parada a quebra de 10% dos fios do cabo, as variáveis de controle serão a amplitude Y_b , Tensão P-S, EDS e temperatura.

3.4.1 Planejamento do Experimento

Para a realização dos ensaios de fadiga com temperatura controlada, alguns dos parâmetros fundamentais foram adotados, de acordo com os ensaios realizados por (Badibanga, 2017) do cabo descrito na seção 3.2.1 e do grampo descrito na seção 3.2.2 desta tese.

Os parâmetros necessários para padronização dos ensaios foram;

i) Ângulo de mergulho, que representa o ângulo entre o cabo e o grampo de suspensão, o ângulo será de 10 graus.

ii) Torque de aperto dos parafusos de fixação do cabo, no grampo de suspensão, que será adotado um aperto de 50 *N.m*.

iii) Carga de pré-tensionamento do cabo, que representa a tensão mecânica diária (*Every Day Stress* – EDS) que o cabo pode suportar em sua vida útil. Os ensaios com temperatura controlada serão realizados com carga de tracionamento equivalente à EDS de 31% e um H/w de 1820 *m*, este valor foi adotado devido aos dados já publicados para efeito comparativo ter sido realizados usando essa EDS.

iv) Amplitude de deslocamento Y_b , medido no condutor a uma distância de 89 *mm* do último ponto de contato do conjunto cabo – grampo. É denominada a amplitude de oscilação do cabo, determinada pela fórmula de *P-S* descrita no capítulo 2. É uma das variáveis de controle e corresponde ao nível de tensão nominal que gera a falha. Para os ensaios foram adotados três diferentes níveis de amplitudes de deslocamentos pico-a-pico, Y_b , os valores de 0,87 *mm*, 0,91 *mm* e 1,01 *mm*, o que representam os valores de amplitudes de tensão de 26,8, 28,22 e 31,35 em *MPa* respectivamente, de acordo com os cálculos. Estes valores foram estabelecidos de acordo com a viabilidade econômica dos ensaios, com parâmetros que proporcionam ensaios não superiores a 100 horas.

Por motivos de ordem prática e econômica e tendo em vista a longa duração dos ensaios e o alto custo, serão realizados de forma exploratória três pontos para cada amplitude da curva *S-N*. A temperatura dos ensaios será fixada em 75°C e os quadros 3.3 e 3.4 apresentam os parâmetros estabelecidos e as condições para os testes exploratórios. Esses valores são relacionados ao parâmetro de H/w de 1820 *m*, correspondente a uma EDS de 31%. Assim, os ensaios serão realizados considerando as condições apresentadas e sumarizados nos quadros

Quadro 3-3 – Amplitudes de deslocamento prescritas nos ensaios EDS de 31%

Amplitude Y_b (<i>mm</i>)	Amplitude de tensão σ [<i>MPa</i>]
0,87	26,8
0,91	28,22
1,01	31,35

Quadro 3-4 – Definições das condições de ensaios

Parâmetros de ensaios	Unidade	Valor imposto	Variação percentual
Ângulo de mergulho	<i>Graus</i>	10°	0,5
Torque de aperto	<i>N.m</i>	50	7,0
Pré tensionamento	<i>kN</i>	16,15	5
Posicionamento do sensor	<i>mm</i>	89	1
Amplitudes	<i>mm</i>	0,87, 0,91 e 1,01	3
Temperaturas	<i>Kelvins</i>	350	±5

3.4.2 Instrumentação da Bancada

O programa experimental deste trabalho consistirá na realização de ensaios de fadiga sob condição de temperatura isotérmica em condutores nus de alumínio e grampo submetidos a carregamentos senoidal, com carga de tracionamento equivalente à EDS de 31%.

Serão desenvolvidas duas etapas de ensaios; a primeira consiste em levantar a curva experimental em 75°C em três pontos para cada amplitude. Cada ensaio terá como base a quantidade de ciclos das estatísticas apresentadas na curva S-N em temperatura ambiente, ou o registro visível de 10% das quebras dos fios de alumínio, critério adotado nos ensaios que servirá de base comparativa. Em uma segunda etapa serão levantadas duas curvas com apenas um ponto para cada amplitude, tendo como critério de parada o registro da primeira quebra. Uma curva S-N em temperatura ambiente do laboratório e outra com temperatura de 75°C serão construídas, esta segunda etapa E2, se deu pela necessidade de verificar as duas curvas usando o mesmo lote de amostras, haja vista, que os dados já publicados em temperatura ambiente pertenciam a um lote diferentes de amostras.

Para a realização dos ensaios, será utilizada a bancada de ensaios mecânicos à fadiga de cabos condutores de energia do Laboratório de Fadiga e Integridade Estrutural de Cabos Condutores de Energia – LABCABOS/UNB. O laboratório conta com três bancadas atualmente. O equipamento desenvolvido para o aquecimento controlado, projetado e construído para esse fim, será acoplado na bancada A. A descrição detalhada da montagem, e a operacionalização do sistema na bancada será discutida nas próximas seções desta tese.

Nos ensaios de fadiga isotérmica é necessário manter constante a força de tração e a temperatura na amostra ensaiada, para fazer o levantamento da curva de fadiga sob o efeito da temperatura. A fim de comprovar esse controle, durante a execução dos ensaios a temperatura será medida com bastante precisão. Será necessário, portanto, usar um transdutor (termopar) a fim de monitorar a temperatura no UPC do cabo grampo. Para isso será utilizado um termopar

tipo *J*, de alta sensibilidade, o qual será ligado no ponto oposto simetricamente ao último ponto de contato do cabo e que será ligado ao ADS 1800 a uma taxa de amostragem de 500Hz.

3.4.3 Preparação do cabo de ensaio e montagem na bancada

Neste item serão descritos os procedimentos que foram realizados na preparação dos corpos de provas que serão utilizados nos ensaios com temperaturas controladas. São procedimentos similares aos utilizados nos ensaios realizados nas amostras em temperatura ambiente.

A amostra do cabo de ensaio (CE) é retirada da bobina, de forma que o comprimento referente à primeira volta de cabo seja desprezado, cada CE possui 46 metros de comprimento. Deve se ter o cuidado para que o CE não entre em contato com materiais que possam danificá-la. Os procedimentos para a realização de todos os ensaios de fadiga e temperatura em cabos condutores seguirão os seguintes passos:

- i) O CE é retirado da bobina e colocado sobre as polias a fim de evitar a formação de trincas e defeitos superficiais oriundos do contato do cabo, principalmente, com objetos cortantes e metálicos. É necessário destacar a importância de evitar torções e dobramentos do cabo tomando como referência o raio da bobina como o mínimo valor a ser respeitado.
- ii) O cabo deve ser fixado nas duas extremidades. De um lado é fixado no grampo de ancoragem passante no final do vão passivo, figura 3.25 a), e presa ao bloco fixo de concreto com uma talha manual, figura 3.25 b). O cabo de ensaio é tracionado utilizando a talha de alavanca, que permanecerá em repouso durante um período, a fim de acomodações de todos os fios. Esse procedimento é realizado para que a tensão aplicada seja uniforme em todos os fios do cabo.



Figura 3-25 – Conjunto de ancoragem do cabo em uma extremidade

- iii) Em seguida, na outra extremidade do cabo é aplicada a carga de tensão, que representa uma carga superior a 10 % que a carga EDS a ser ensaiada, (para este caso EDS de 31%). Isso é

possível adicionando peso na gaiola que é responsável pelo tracionamento do CE. A figura 3.26 a), mostra o dispositivo responsável pelo tracionamento do cabo, que faz parte do conjunto de ancoragem. Na outra extremidade que é fixado em outro grampo de ancoragem passante, onde é ligada a célula de carga (figura 3.26 b)), que é responsável pela leitura da carga de tracionamento no CE (figura 3.26 c)),



Figura 3-26 – Conjunto de fixação da amostra na outra extremidade

iv) O cabo permanece esticado por no mínimo de 6 horas para acomodar e distribuir a tensão, após este tempo a tensão no cabo será reduzida a 31% da EDS que é a carga de esticamento do ensaio. Vale ressaltar que não existe norma para o tempo de acomodação do cabo.

v) Após passar o cabo de ensaio (CE) pelo grampo de ancoragem, ele é posicionado junto ao bloco de apoio. A fixação dos parafusos do grampo de suspensão é feita com um taquímetro através de um torque de 50 *N.m*.

vi) Em seguida o CE é fixado à mesa do *shaker* (figura 3.27), que é o equipamento responsável por provocar na amostra a oscilação de excitação do cabo. Os ensaios realizados para a composição deste trabalho tiveram a frequência entre 15 a 25 *Hertz*.

vii) Medir a partir do último ponto de contato entre cabo e grampo de suspensão a distância de 89 *mm*. Por meio de um suporte de braçadeira é fixado o acelerômetro para obter o deslocamento *Yb* e realizar o controle durante o ensaio. A figura 3.28 apresenta o suporte do acelerômetro e laser já posicionado. O laser, que é colocado neste ponto, auxiliará na detecção das quebras e fará a obtenção da quantidade de ciclos que ocorreu cada uma.

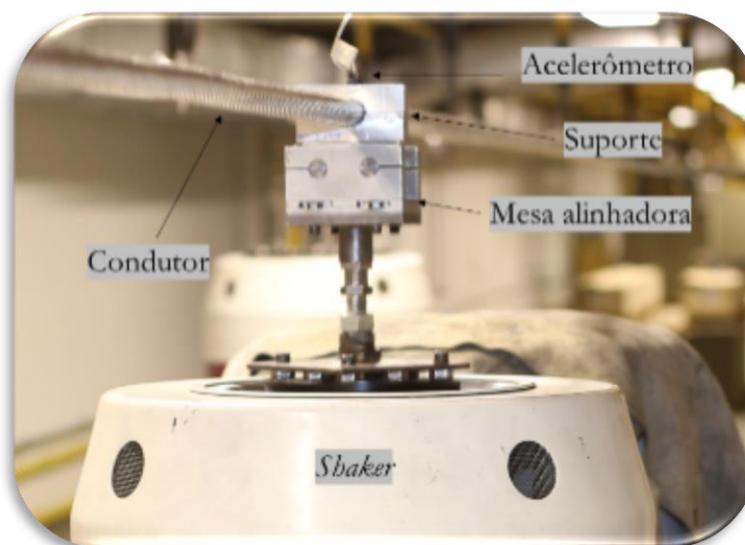


Figura 3-27 – Montagem do cabo na mesa do shaker

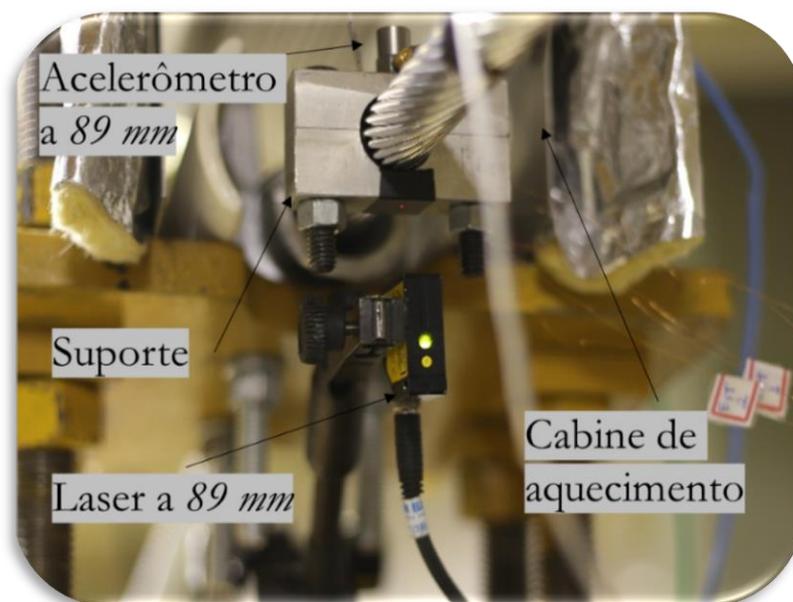


Figura 3-28 – Braçadeira de Fixação ponto 89 mm

viii) Em seguida, e com o cabo tracionado, são colados os três extensômetros nos três fios da parte superior do condutor. Antes da colagem dos extensômetros é importante fazer a preparação da superfície por meio de uma limpeza, além de um cuidado no posicionamento, na colagem dos extensômetros nos fios, com o intuito de minimizar os erros.

A figura 3.29 apresenta o CE já instrumentado com os três extensômetros no topo já colados, estes procedimentos foram realizados em todas as amostras dos ensaios realizados nesta tese.

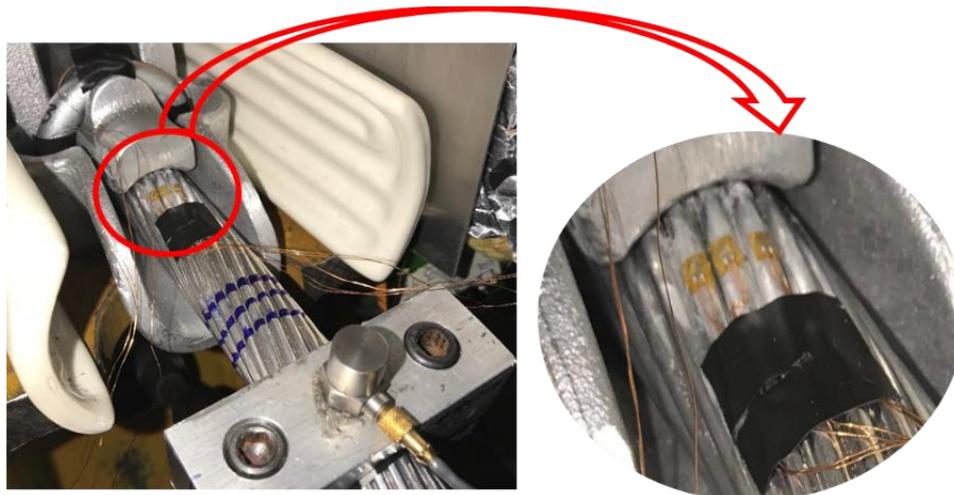


Figura 3-29 – Posição dos extensômetros colados no topo do CE

ix) O termopar, será fixado simetricamente oposto ao UPC no cabo de ensaio, de modo a não interferir nas medidas dos extensômetros. A Figura 3.30 apresenta a posição da instalação do termopar, que fará a aferição da temperatura durante os ensaios. No detalhe (figura 3.30 ampliada) é possível perceber a posição em que o termopar foi instalado no CE, na parte de trás da cabine de aquecimento simetricamente ao oposto do UPC.

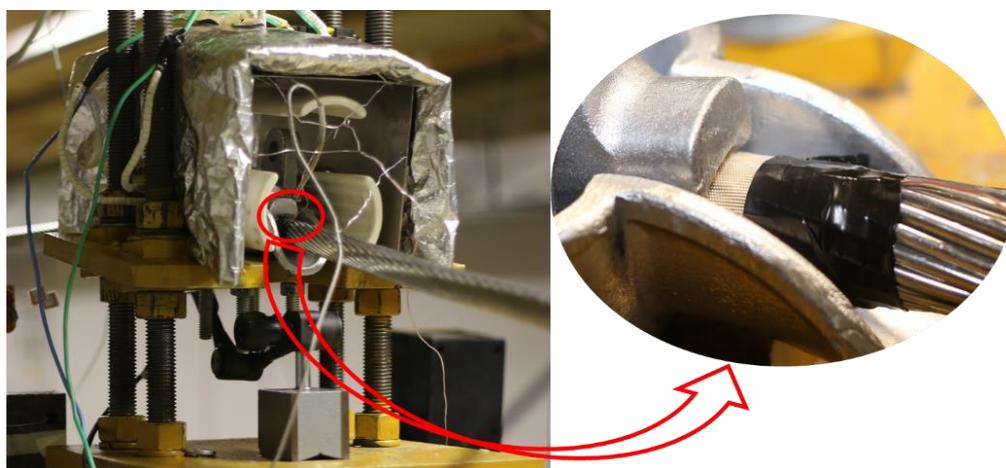


Figura 3-30 – Instalação do termopar tipo J, no detalhe ampliado

Este ponto é o mesmo que servirá de referência para o *set point* do controlador de temperatura, a partir da qual as gravações temporais serão realizadas continuamente. Desta forma, o sistema de monitoramento e controle da temperatura será realizado durante todo o ensaio.

Esta posição para o termopar foi adotada pelo fato de que no UPC estão colados os extensômetros, o que inviabilizaria a colocação do termopar, pois o espaço é limitado. Então,

foi verificado na posição oposta. Coletado as temperaturas em alguns testes, nota-se pela simetria do sistema de aquecimento, que era a mesma, conforme descrito na secção 3.3.8.

x) Em seguida é feita a montagem da cabine de aquecimento, que será posicionada sobre o conjunto cabo grampo, para manter constante a temperatura apenas no local. O equipamento experimental já montado pode ser visualizado na figura 3.17.

xi) Depois de finalizadas as etapas anteriores, foi realizado o Ensaio Dinâmico, que consiste em fazer uma varredura no cabo, com o objetivo de encontrar as frequências de ressonância do condutor e dessa forma determinar a frequência a ser utilizada no ensaio. A frequência deve ser menor do que a frequência de ressonância do ensaio, uma vez que na frequência de ressonância as respostas são mais aleatórias. Além disso, este ensaio permite encontrar o nó mais próximo ao grampo, onde será instalado o equipamento detector de quebras.

Também são verificados os valores da deformação apresentados pelos Extensômetros, a partir dos quais, são calculadas as tensões pela lei Hooke, que são comparadas com as pré-determinadas a partir da equação de Poffenberger-Swart ($P-S$) se estão coerentes, admite-se erros de até 20%.

xii) Pausar o teste e realizar a montagem do dispositivo utilizado para detecção de quebra de fios no ponto marcado, conforme mostrado na figura 3.31. As quebras são verificadas com o dispositivo da figura 3.31 que é montado no primeiro nó do CE a partir do grampo de suspensão.



Figura 3-31 – Conjunto de detecção das quebras

A detecção de quebra de fios permite identificar o instante (número de ciclos) em que ocorreu a quebra de um fio do cabo. O dispositivo é composto por duas hastes de alumínio

presas ao cabo por uma abraçadeira e dois sensores de deslocamento a laser. O dispositivo de detecção de quebras monitora o fenômeno de o condutor girar ou distorcer quando um fio quebra. O critério de falha estabelece que a falha por fadiga do cabo ocorre quando atinge a quebra de 10% dos fios do cabo.

Por fim, é necessário acompanhar as quebras dos fios no CE para determinar o número de ciclos que ocorre a falha a fim de fazer o levantamento da curva S-N. Vale ressaltar que o ensaio tem uma longa duração e alto custo, portanto por motivos de ordens práticas são reduzidos os números de ensaios.

O projeto do dispositivo de quebra dos fios é baseado no processo de fabricação do condutor, observando-se que o cabo é formado pelo encordoamento de fios metálicos. O dispositivo de detecção de quebras monitora o fenômeno do condutor girar ou distorcer quando o fio quebra.

xiii) Além da régua para verificar a quantidade de ciclos de cada quebra, neste trabalho serão utilizados os extensômetros de topo e mais quatro extensômetros na base do cabo de ensaio para detecção da quantidade de ciclos em que cada quebra aconteceu. O ensaio será finalizado quando ocorrer a identificação de quebra de 10% dos fios de alumínio do CE, ou a quantidade estipulada das estatísticas ensaiadas para este cabo.

3.4.4 Sistema de Aquisição de Dados

Para fazer a aquisição dos dados foi utilizado um sistema fabricado pela *Lynx Tecnologia*, modelo ADS1800 de oito canais, possui alta performance com entradas analógicas universais configuráveis individualmente por software. A comunicação com o microcomputador foi realizada via rede Ethernet (TCP/IP). As gravações foram realizadas usando um software dedicado fornecido pela mesma empresa (*AqDados*). Para os dados coletados através dos sete extensômetros e do termopar tipo *J*. O equipamento é dotado de entradas analógicas e digitais, entretanto só foram usadas para a pesquisa os canais analógicos, que foram configuradas individualmente para os sensores através do software de aquisição de dados.

Usando o *software Aq dado* na opção de configuração das entradas analógicas, foram realizadas as configurações dos sete canais para os extensômetros e um canal para o termopar. Neste trabalho, foram utilizados os *strain gauges* de 350 *Ohms* com fator de sensibilidade de 2,08. A calibração dos extensômetros é realizada em duas etapas distintas: com o CE frio e aquecido. Primeiro far-se-á a calibração para a validação do ensaio dinâmico com a amostra e

extensômetros frios. Este procedimento é necessário para averiguar se as tensões de $P-S$ está de acordo com os cálculos analíticos, se estiver dentro dos parâmetros de ensaios, segue para a segunda calibração. Após o aquecimento do conjunto cabo/grampo e estabilização da temperatura de ensaio, é realizada uma nova calibração nos sete extensômetros com a amostra já aquecida e pronta para iniciar o ensaio. (vide capítulo 2, seção 2.4, a necessidade deste procedimento).

Conforme exemplificado na figura 3.32 é possível visualizar a interface gráfica para realizar as configurações dos canais analógicos. Desta forma, para acessar o modo de gravação dos dados, e gravar continuamente o ensaio (modo utilizado em todos os ensaios desta tese), na aba ensaio, entradas analógicas, abrirá a aba configuração de canais. Nesta aba é possível fazer todas as calibrações e configurações dos sensores.

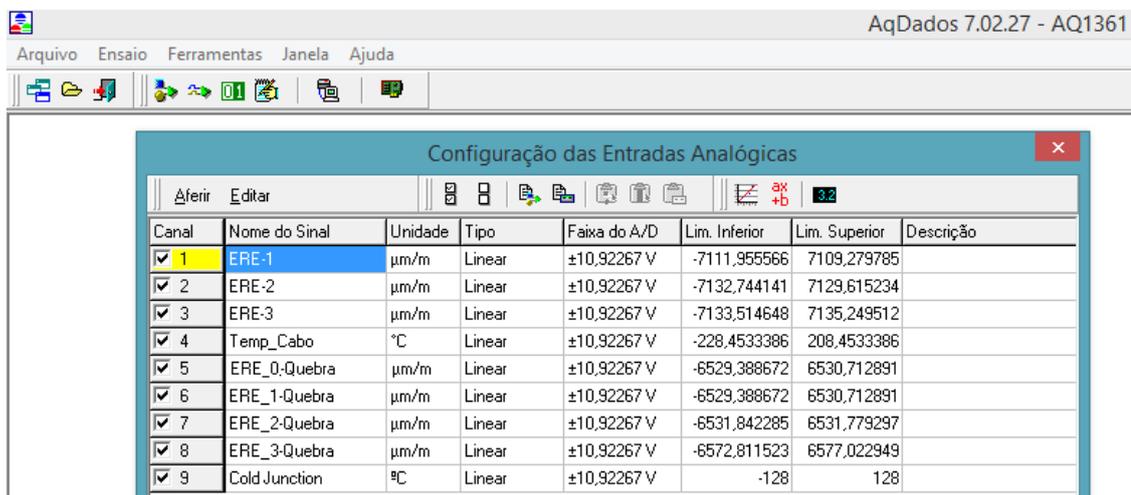


Figura 3-32 – Interface do software *Aqdado*, com os canais já configurados

Para configurar a gravação contínua, as etapas de configuração estão sendo indicadas pelas setas e estão circuladas. Na aba ensaio, opção parâmetros, escolher a configuração de controle, conforme exemplificado na figura 3.33. Optou-se pela taxa de gravação de 500Hz para a aquisição dos dados contínuos. Para configurar a gravação contínua, basta selecionar a opção “Modo de Aquisição: Múltiplo sequencial”. Configurando o tempo de gravação de cada pacote, optou-se por pacotes de uma hora. Deve-se observar, que a cada ensaio deve ser iniciado do pacote número 1, (opção: N° do primeiro pacote), e marcar o valor para o último pacote, neste ensaio foi de 36 pacotes. Vale salientar a importância de marcar sempre valores superiores de número de pacotes nesta opção, para não correr o risco de perder gravações de dados. Por exemplo, ensaio de 24 horas, marcar 36 pacotes, conforme exemplo (opção: N° do último pacote).

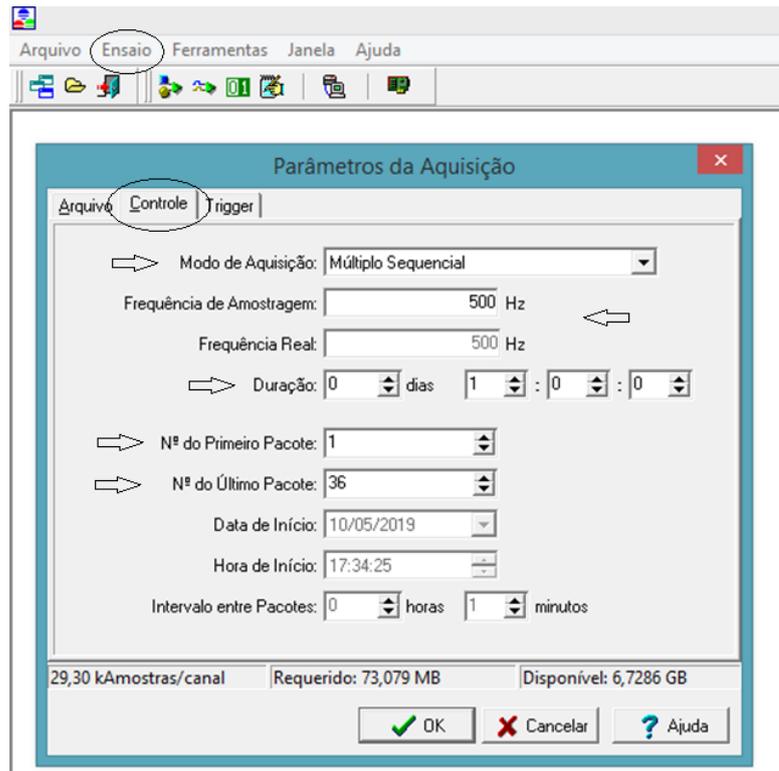


Figura 3-33 – Configuração do modo de aquisição para os ensaios de até 36 horas.

3.4.5 Sistema de Controle das Bancadas

O software de controle do agitador eletrodinâmico (*shaker*), fornecido pelo fabricante, é programado para manter os valores de deslocamento pico-a-pico, frequência e forma de onda no ponto 89 mm. Ele tem o papel de monitorar o sinal de intertravamento do sistema, desligando e interrompendo o ensaio quando a anormalidade é observada no sistema de circuito fechado de vibração. Em princípio, o agitador eletrodinâmico opera com campo eletromagnético, onde o movimento é realizado através do campo criado pela corrente elétrica na bobina da armadura. Fornece movimentos para ensaios senoidais, a blocos de carregamentos senoidais, a ensaios randômicos ou de choque. Para o presente trabalho foi usada apenas a rotina para ensaios senoidais.

O papel do controlador é garantir que os parâmetros que foram inseridos no programa sejam os sinais de saída no sensor do controlador, neste caso o acelerômetro. A verificação da amplitude no ponto 89 mm é obtida a partir do acelerômetro instalado neste ponto. O sinal oriundo do acelerômetro passa pela amplificação, filtragem, diferenciação e integração. Nesta

pesquisa, os acelerômetros piezoelétricos foram utilizados, com medidas capturadas pelo *software* de sistema de controle e análise de vibração do Laser USB LDS.

3.5 INSTRUMENTAÇÃO PARA DETECÇÃO DAS QUEBRAS USANDO MEDIÇÕES COM STRAIN GAUGES (EXTENSÔMETROS DE RESISTÊNCIA ELÉTRICA)

Nesta tese os extensômetros foram utilizados para realizar a detecção das quebras dos fios e fazer a validação dos ensaios usando a equação de *Poffenberger-Swart* ($P-S$) (apresentada no capítulo 2, seção 2.3). Esta equação é usada para a obtenção da tensão nominal na zona de falha, onde é feita a associação da amplitude de flexão dos condutores medidos a 89 mm do UPC entre o condutor e o grampo de suspensão (Y_b). Além disto, foi realizado a aquisição temporais de dados durante os ensaios, na qual foi possível verificar a validação e determinar a abrangência e limitações da equação de $P-S$ durante a execução do ensaio. Assim sendo, utilizou-se a forma clássica e usual já consolidada pela literatura para o cálculo da tensão nominal e validação de todos os ensaios, utilizando a fórmula de $P-S$ para o cálculo. Os resultados serão apresentados e discutidos no capítulo 4.

O CE foi instrumentado com três extensômetros colados nos fios de topo da camada mais externa do condutor, este procedimento é realizado para estabelecer uma correlação entre a deflexão pico a pico do cabo em um ponto padrão (89 mm) e a amplitude de tensão nominal no último ponto de contato cabo/grampo.

Os mesmos extensômetros colados no topo foram utilizados para fazer a monitoração no decorrer do ensaio, juntamente a eles foram acrescentados mais quatro extensômetros na base do CE, os quais foram ligados a um aquisitor de dados a uma frequência de até 500 Hz . As gravações temporais serão realizadas continuamente.

Com isso, do primeiro ao quinto ensaios foram usados apenas os extensômetros de topo para a verificação das quebras. Do quinto ao sétimo ensaios foram colados além dos extensômetros usuais de topo, três extensômetros na base conforme figura 3.34. Observando a necessidade de monitorar todos os fios de contato com o grampo na base, foi acrescentado um quarto extensômetro para os últimos ensaios. Sendo assim, do oitavo ensaio em diante todos os CE passaram a ser instrumentados com sete extensômetros para detecção das quebras, sendo; três de topo e quatro na base.

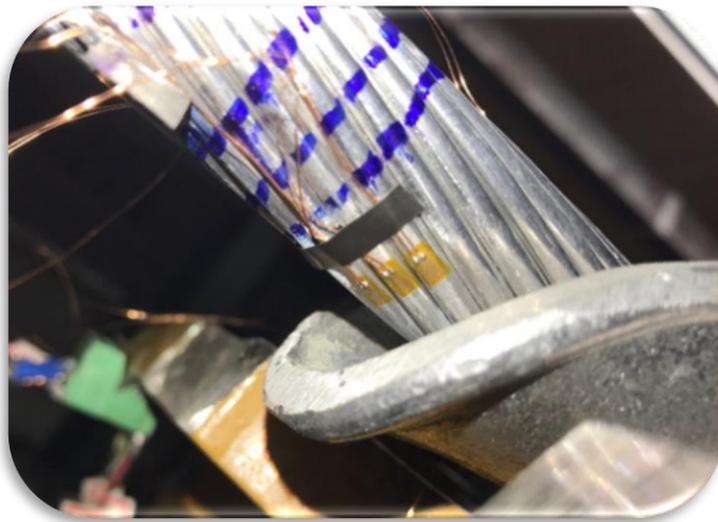


Figura 3-34 – Extensômetros colados nos fios externos na base do CE

Para diferenciar os sinais dos canais do aquisitor de dados no monitor de observação, os extensômetros de topo foram nomeados de ERE-1, para o fio de topo esquerdo, ERE-2 para o fio central e ERE-3 para o fio de topo direito. Já para os extensômetros da base, foram nomeados de Quebra-ERE-0, para o primeiro fio do CE que era observado em contato na base do grampo, sendo que a contagem era realizada sempre em sentido horário, desta forma o último fio era denominado de Quebra-ERE-3, conforme pode ser observado na figura 3.35.

Desse modo, a sequência nem sempre coincide com a configuração da figura 3.35 b), pois quando o CE é colocado no grampo de ancoragem, os fios adquirem uma configuração distinta em cada ensaio. Sendo assim, os extensômetros de base foram colados em fios diferentes a cada ensaio, porém, sempre entre os fios, oito e treze, conforme configuração observada na figura 3.35 a).

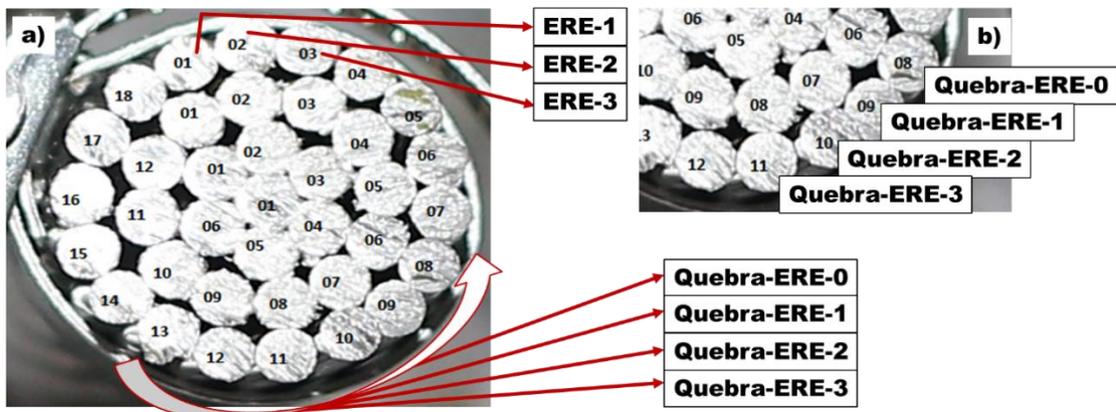


Figura 3-35 -- Configuração dos extensômetros no CE.

A escolha dos fios a serem colados os extensômetros a cada ensaio dependerá sempre da acomodação dos fios do CE no grampo de ancoragem. Os resultados e discussão sobre as detecções das quebras usando extensômetros serão descritos no memorial de ensaio, APÊNDICE C, onde serão apresentadas as quebras e quantidade de ciclos associada a cada uma, para todos os ensaios.

3.5.1 Leitura das Quebras em Tempo Real

As identificações das quebras foram realizadas em tempo real através da tela de monitoração dos sinais usando o *software AqDados*. Através da leitura da deformação nos extensômetros foi possível verificar as quebras internas e externas. Entretanto, só foi possível identificar com precisão os fios das quebras externas, já nas quebras internas foi possível identificar o momento exato da ocorrência, não sendo possível concluir a identificação de qual fio quebrou durante o ensaio, só após a abertura da amostra. Na foto da figura 3.36 é possível verificar o comportamento dos sinais captados pelos extensômetros em tempo real, ou seja, durante a execução do ensaio é possível verificar as ocorrências das quebras conforme supracitados. A figura 3.36 a) indica os sinais do extensômetros e no detalhe o sinal aumentado, da figura 3.36 b) apresenta a foto das quebras externas dos fios de topo do ensaio EN-10-A1-1/3-75°C.

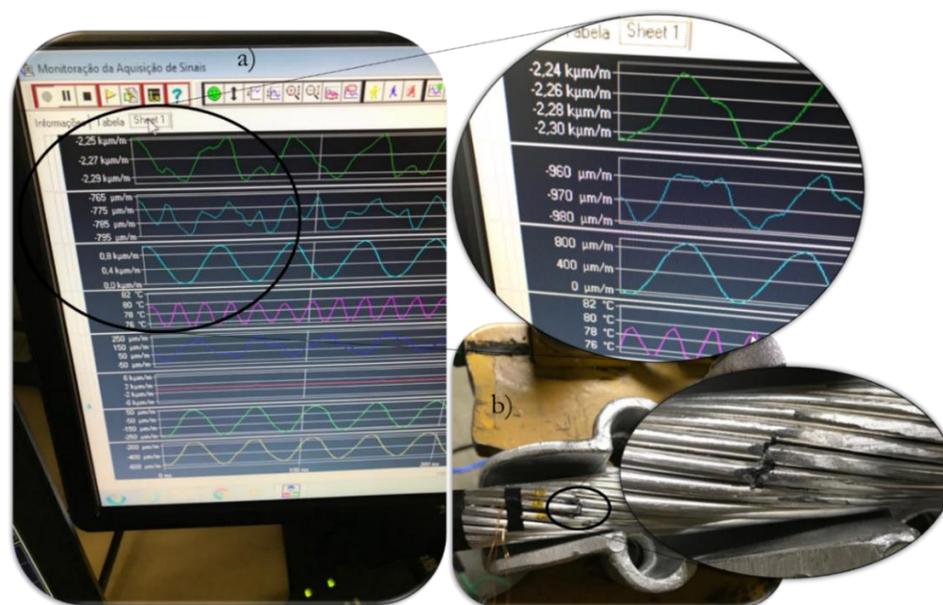


Figura 3-36 – Indicação de quebras externas do ensaio EN-10-A1-1/3-75°C.

No ensaio dez só foi possível confirmar as quebras internas após a abertura da amostra, já as falhas externas são indicadas através dos extensômetros em tempo real. Neste ensaio houve

quatro quebras externas, mais detalhes da identificação das quebras estão no APÊNDICE C, e dos registros de quebras em tempo real estão APÊNDICE D.

Na foto da figura 3.37 pode ser verificado o comportamento da indicação de quebras internas no ensaio EN-16-A1-1/3-75°C. A figura 3.37 a) indica os sinais dos extensômetros com a deformação no início do ensaio. Na figura 3.37 b) mostra a ocorrência das deformações e no detalhe o sinal aumentado. As quebras foram registradas pelos sinais de deformações dos extensômetros e foram registradas nas fotos da tela de monitoração dos sinais em tempo real. Os fios rompidos do ensaio EN-10-A1-1/3-75°C foram instrumentados com a ERE-01 colada no fio externo de topo 01, ERE-02 colada no fio externo de topo 02 e Quebra-ERE-01 colada no fio externo 11 da base.

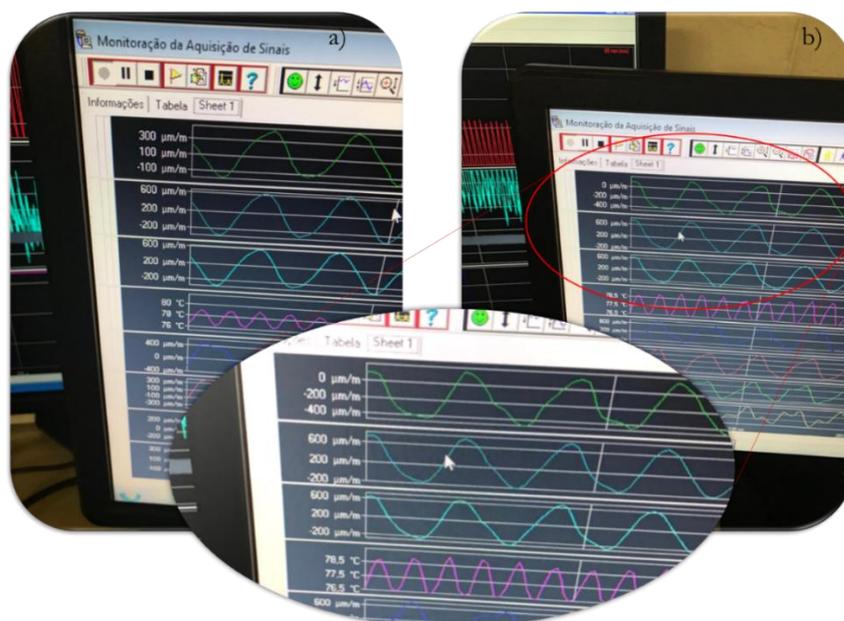


Figura 3-37 – indicação de quebras internas no ensaio EN-16-A1-1/3-75°C

3.6 COLETA DE DADOS DOS ENSAIOS DAS ETAPAS E1 & E2

Ao todo foram realizados 18 ensaios de resistência à fadiga, 14 ensaios sob efeito de temperatura, e 4 ensaios em temperatura ambiente. Todos os ensaios foram monitorados utilizando-se das técnicas com uso de acelerômetros, extensômetros e por meio da medição de deslocamento utilizando o sensor laser (conforme descrito na seção 3.4). Todas essas informações foram gravadas de forma contínua e, por segurança, inspeções visuais foram realizadas de forma periódica. Além da metodologia tipicamente utilizada para a monitoração

das quebras dos fios, nesse trabalho procurou-se avaliar se a análise das deformações medidas nos fios da camada externa do condutor através dos extensômetros, o que permitiu detectar com uma maior acurácia as quebras dos fios, detalhados no memorial dos ensaios APENDICE C.

Sendo assim, cada cabo de ensaio (CE) foi utilizado para coletar três pontos em cada amplitude para compor a curva S–N. Esta metodologia é adotada, pois até o momento presente não houve registro de discrepância que venha interferir nos resultados, pelo uso do mesmo CE para os demais pontos.

Para a composição da curva S-N, foram realizados os testes usando CE aleatórios para compor cada grupo de amostras, seguindo sempre a mesma metodologia. A aleatoriedade da ordem dos ensaios se deu pelo fato de ser um trabalho exploratório pelo uso da temperatura de 75°C , por esta questão houve a necessidade de se fazer o levantamento da curva exploratória de um ponto, a fim de verificar se haveria a possibilidade de seguir aplicando a mesma quantidade de ciclos, já realizados nos ensaios em temperatura ambiente, publicado anteriormente.

Cada cabo de ensaio era composto por 46 metros de cabo, terão a nomenclatura de cabo de ensaio (CE–n), sendo $n = 01, 02 \dots 07$, 01 o primeiro cabo de ensaio, sendo CE–01, e CE–06, o último cabo utilizado. Cada CE produziu 3 amostras, o que constitui cada grupo de três ensaios para cada amplitude obtidos para a E1.

Para um melhor entendimento, os ensaios terão uma nomenclatura $n/3$, sendo $n= 1, 2$ e 3 , 1 para o primeiro ensaio de cada CE, amostra oriunda de um CE novo. A segunda vez o CE terá sempre a nomenclatura de $2/3$, e para a CE ensaiado pela terceira vez, será $3/3$. As amostras obedecerão às mesmas nomenclaturas, produzindo assim os grupos de amostras, as quais terão as nomenclaturas completa para cada ensaio de; $A_{n-1/3}$, $A_{n-2/3}$ e $A_{n-3/3}$, onde n representa a amplitude ensaiada, 1 para $0,87\text{ mm}$, 2 para $0,91\text{ mm}$ e 3 para $1,01\text{ mm}$ conforme detalhadas nas figuras 3.38, a figura 3.38 a) exemplifica a nomenclatura dos grupos de ensaios e figura 3.38 b) mostra a nomenclatura para os ensaios. Serão denominados de grupo de amostra, para cada amplitude ensaiada, foram preservadas as amplitudes já designadas no trabalho publicado, que servirá de base comparativa. O H/w escolhido foi de 1820 m . Sendo assim, a primeira etapa será denominado de Grupo de amostra da etapa 1 (E1), para amplitude de Y_b de $0,87\text{ mm}$ (A1), para a amplitude de $0,91\text{ mm}$ (A2) e para a amplitude de $1,01\text{ mm}$ (A3), todos os ensaios de fadiga da E1 foram submetidos a uma temperatura de 75°C . Ficando a nomenclatura para

cada grupo de amostras E1-A1-75°C, E1-A2-75°C e E1-A3-75°C o que corresponde ao Y_b de 87 mm, 0,91 mm e 1,01 mm respectivamente, conforme.

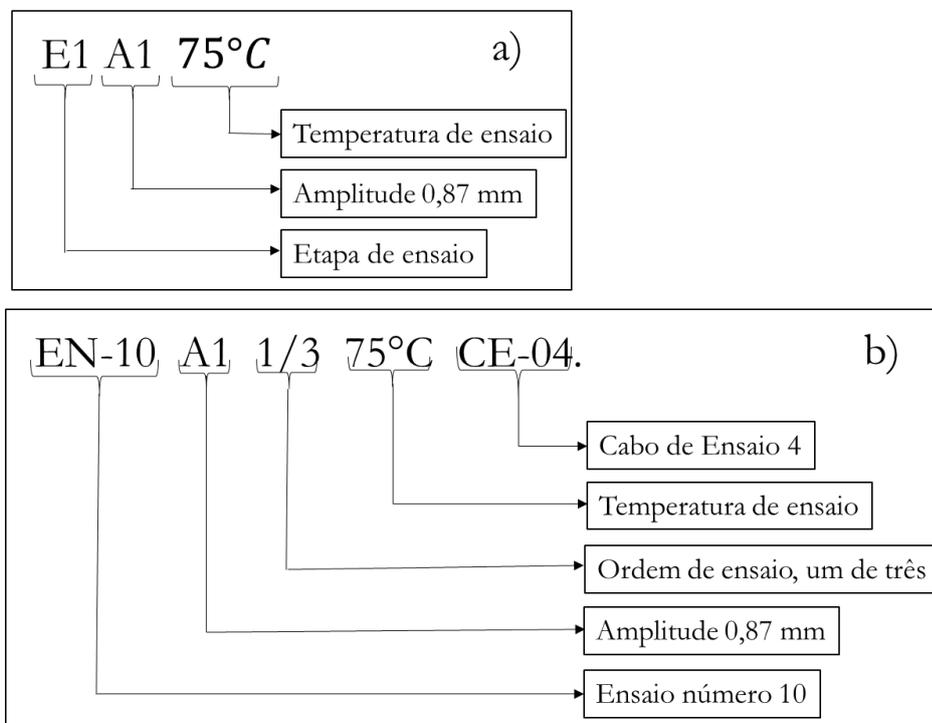


Figura 3-38 – Nomenclatura estabelecidas para os grupos de ensaios a), e para a descrição dos ensaios b).

Tendo o critério de parada para a primeira quebra de fio, o grupo de amostras para a segunda etapa (E2), foram realizados apenas um ponto para cada amplitude, em temperatura de 75°C e um ponto em temperatura de 21°C, isso se fez necessário para a construção de uma curva $S-N$ comparativa, apenas para a primeira quebra, usando a mesma metodologia de detecção de quebras. Nestes ensaios, foram interrompidos assim que era registrado a primeira quebra (CIGRE, 2008), pelo uso de extensômetros. Ficando dois grupos, um grupo de amostras para todas as amplitudes de Y_b (0,87 mm, 0,91 mm e 1,01 mm) ensaiados em temperatura de 21°C, designados de E2-YBs-21°C, e para os ensaios realizados em 75°C ficou nomeado de E2-YBs-75°C.

As nomenclaturas sempre irão obedecer a uma ordem de siglas o qual facilitará a leitura dos resultados graficamente e tabular. Assim, a seguinte ordem será obedecida em todas as descrições quando necessário, aparecendo o número de ensaio, a amplitude ensaiada, a

quantidade de vezes que o cabo foi utilizado, a temperatura, o cabo de ensaio utilizado e a etapa. Exemplo para a descrição do memorial de ensaio EN-10-A1-1/3-75°C-CE-04-E1

Para identificar as ocorrências de quebras foram utilizadas várias técnicas para as análises dos sinais, a fim de confirmar cada evento de quebra e a quantidade de ciclos atribuídos.

- i) Foram verificados os gráficos gerados pelos sinais do TFC, metodologia já consolidada no laboratório LABCABOS.
- ii) Verificação dos relatórios dos sinais captados pelos extensômetros, onde as estatísticas foram realizadas a cada hora e os sinais foram tabulados, gerando os gráficos da evolução temporal dos ensaios. Sendo possível fazer a confirmação das ocorrências das falhas. No APÊNDICE E é possível verificar alguns quadros dos sinais captados pelos extensômetros e dos lasers do EN-09, onde é mostrado os procedimentos para identificar as quebras ocorridas.
- iii) As quebras foram confirmadas através dos gráficos das estatísticas dos sinais de desvio padrão, RMS, Max e min dos sinais captados a partir dos extensômetros.
- iv) Em todos os ensaios, as gravações dos sinais captados pelos Lasers, também foram utilizados para as confirmações das quebras.

3.6.1 ensaios em temperatura ambiente dados da literatura

Os dados para a construção das Curvas $S-N$ em temperatura ambiente foram extraídos dos ensaios realizados por (Badibanga, 2017) e publicados em sua tese de doutorado pela Universidade de Brasília. Para efeito de comparação, os ensaios foram conduzidos de forma a utilizar os mesmos níveis de tensões com carga de tracionamento equivalente à EDS de 31% e um H/w de 1820m e procedimentos de instrumentação semelhantes para a temperatura controlada de 75°C, foram realizados seguindo a mesma metodologia para efeito comparativo, e mantendo o padrão das variáveis em observação. Para efeito de comparação será adotada a curva padrão, denominada *Safe Border Line*(CSBL), que será utilizado a forma simplificada, na qual são considerados apenas os parâmetros da curva para $N < 1,56.10^7$, e será utilizada na comparação com a vida útil mensurada para o cabo, nos ensaios com temperatura.

3.6.2 Ensaio da Primeira Etapa (E1)

Os grupos denominados primeira etapa foram compostos pelos grupos de amostras E1-A1-75°C, E1-A2-75°C e E1-A3-75°C, todos os ensaios seguiram a metodologia já adotada no laboratório pelos pesquisadores do laboratório LABCABOS. A metodologia consiste na utilização de uma mesma CE, para realizar três ensaios, repetindo assim, o ensaio em uma mesma amplitude para construção da curva S-N, as evoluções e demais informações sobre cada ensaio está no APENDICE C, onde é relatado toda as condições adversas e algumas eventualidades particulares, de cada ensaio de maneira a explicar os resultados de uma forma mais satisfatória.

3.6.2.1 Grupo de amostras com YB 0,87mm (GA-E1-A1-75°C)

O grupo de ensaios da primeira etapa é apresentado na foto da figura 3.39 que ilustra o conjunto de amostras denominado de GA-E1-A1-75°C, que constitui se para compor a primeira estatística da curva S-N, o conjunto foi formado pelos ensaios, EN-10, EN-02, e EN-09, todos realizados no ano de 2018 e submetidos à mesma amplitude de solicitação.



Figura 3-39 - Grupo de ENSAIOS YB=0,87mm, GA-E1-A1-75°C

Na figura 3.39, pode se perceber, que neste grupo de amostras, o primeiro ponto foi o ensaio 10 denominado de (EN-10-A1-1/3-75°C_CE04), o ensaio de fadiga sob temperatura de 75°C foi realizado nos dias 11 e 12 do mês de outubro, sendo o CE-04 usado pela primeira vez, ou seja, cabo novo. O segundo ponto foi o EN-02-A1-1/3-75°C_CE-01, usando o CE-01, ensaio realizado nos dias 27, 28, 29 e 30 de julho, que consistiu no uso da segunda vez do CE-01, o qual já havia sido utilizado. O terceiro ponto, foi o EN-09-A1-1/3-75°C_CE-03, foi realizado com um cabo já utilizado duas vezes, as estatísticas de ciclos são apresentadas no quadro 3.5,

que está sumarizado a quantidade de ciclos que cada ensaio e cada cabo de ensaio foram submetidos, já o quadro 3.6 apresenta a quantidade de falhas de cada ensaio a quantidade ciclos em que a falha ocorreu.

Quadro 3-5 – Resumo da quantidade de ciclos de cada ensaio e cada cabo do GA-E1-A1-75°C

ENSAIOS (EN)	EN-10	EN-02	EN-09
Amostras	A1-1/3	A1-2/3	A1-3/3
CABO DE ENSAIO (CE)	CE-04	CE01	CE03
Total de ciclos de cada EN	3,11 x10 ⁶ Ciclos	3,02 x10 ⁶ Ciclos	2,75 x10 ⁶ Ciclos
Total de ciclos de cada CE	3,11 x10 ⁶ Ciclos	5,03 x10 ⁶ Ciclos	7,81 x10 ⁶ Ciclos

Quadro 3-6 - Resumo da quantidade de falhas de cada ensaio do GA-E1-A1-75°C,

EN 10 1/3 75°C	Ciclos	EN 02 1/3 75°C	Ciclos	EN 09 3/3 75°C	Ciclos
1ª quebra	1,13E+06	1ª quebra	9,67E+05	1ª quebra	1,04E+06
2ª quebra	1,54E+06	2ª quebra	1,35E+06	2ª quebra	1,29E+06
3ª quebra	1,62E+06	3ª quebra	2,21E+06	3ª quebra	1,38E+06
4ª quebra	1,88E+06	4ª quebra	2,76E+06	4ª quebra	1,46E+06
5ª quebra	2,13E+06			5ª quebra	2,17E+06
6ª quebra	2,46E+06			6ª quebra	2,48E+06
7ª quebra	2,93E+06			7ª quebra	2,66E+06
8ª quebra	3,05E+06				

3.6.2.2 Grupo de amostras com YB 0,91mm (GA-E1-A2-75°C)

O grupo de ensaios da primeira etapa GA-E1-A2-75°C, constitui na formação da segunda amplitude ensaiada e compõem o segundo ponto para construção da curva S-N, os ensaios foram realizados no ano de 2018, a foto da figura 3.40 apresenta as três amostras já retirada da bancada de ensaio.

O primeiro ponto foi o EN-07 constituindo a amostra 1/3, o ensaio de fadiga sob temperatura foi realizado nos dias 23 e 24 do mês de setembro, sendo o CE-03 usado pela primeira vez, ou seja, cabo novo. O segundo ponto foi o EN-11 constituindo a amostra 2/3, usando o CE-04, o ensaio foi realizado nos dias 15 e 16 de outubro, que consistiu no uso pela segunda vez do CE-04. O qual já havia sido utilizado no ensaio anterior.



Figura 3-40 - Grupo de ensaios com YB= 0,91mm, GA-E1-A2-75°C.

O terceiro ponto, foi o EN-03 sendo o 3/3, realizado com a CE-01, nos dias 07, 08, 09 e 10 de agosto, houve uma interrupção no ensaio, pois a mesa do shake veio a romper durante o processo. O CE-01, já havia sido utilizado duas vezes, tendo um histórico de ciclos sumarizado no quadro 3.7, e no quadro 3.8 apresenta a quantidade de falhas de cada ensaio a quantidade ciclos em que a falha ocorreu. Lembrando que todos os detalhes nas identificações destas falhas, e particularidades dos ensaios estão descritas com detalhes no APENDICE C.

Quadro 3-7 – Resumo da quantidade de ciclos de cada ensaio e cada cabo do GA-E1-A2-75°C

ENSAIOS (EN)	EN 07	EN 11	EN 03
Amostras	A ₂ -1/3	A ₂ -2/3	A ₂ -3/3
CABO DE ENSAIO (CE)	CE03	CE04	CE01
Total de Nx10 ⁶ ciclos de cada EN	2,33	1,93	2,71
Total de Nx10 ⁶ ciclos de cada CE	2,33	5,23	7,74

Quadro 3-8 - Resumo da quantidade de falhas de cada ensaio do GA-E1-A2-75°C,

EN 07 1/3 75°C	Ciclos	EN 11 1/3 75°C	Ciclos	EN 03 3/3 75°C	Ciclos
1ª quebra	7,94E+05	1ª quebra	6,13E+05	1ª quebra	7,87E+05
2ª quebra	9,50E+05	2ª quebra	1,28E+06	2ª quebra	1,10E+06
3ª quebra	1,16E+06	3ª quebra	1,35E+06	3ª quebra	1,55E+06
4ª quebra	1,42E+06	4ª quebra	1,83E+06	4ª quebra	1,62E+06
5ª quebra	1,67E+06	5ª quebra	2,16E+06	5ª quebra	1,70E+06
6ª quebra	2,18E+06	6ª quebra	2,58E+06	6ª quebra	1,84E+06
7ª quebra	2,50E+06			7ª quebra	2,46E+06
8ª quebra	2,70E+06			8ª quebra	2,50E+06
				9ª quebra	2,68E+06
				10ª quebra	3,05E+06

3.6.2.3 Grupo de amostras com YB 1,01mm (GA-E1-A3-75°C)

Para os três pontos das estatísticas que comporão o terceiro ponto da curva SN, foram realizados mais três ensaios, a foto das amostras pode ser visualizada na figura 3.41, foi denominada de GA-E1-A3-75°C, todos os ensaios deste grupo foram realizados no ano de 2018.



Figura 3-41 - Grupo de amostras com YB 1,01mm, GA-E1-A3-75°C

A primeira estatística foi o EN-04 sendo o ensaio 1/3, o ensaio de fadiga e temperatura foram realizados nos dias 25 e 26 do mês de agosto, sendo usado o CE-02 pela primeira vez. O segundo ponto de estatística foi o EN-08 sendo o ensaio 2/3, usando o CE-03, o ensaio foi realizado nos dias 27, 28 e 29 de setembro, que consistiu no uso pela segunda vez do CE-03. O terceiro ponto, foi o EN-06 sendo o ensaio 3/3, e foi realizado nos dias 09 e 10 de setembro, também com o CE-02 utilizado duas vezes anteriormente, A quantidade total aproximada das estatísticas de ciclos de cada cabo de ensaio e cada ensaio está sumarizada no quadro 3.9. e no quadro 3.10 apresenta a quantidade de falhas de cada ensaio a quantidade ciclos em que a falha ocorreu. Caso queira acompanhar as identificações destas falhas estão descritas com detalhes no APENDICE C.

Quadro 3-9 – Resumo da quantidade de ciclos de cada ensaio e cada cabo do GA-E1-A3-75°C

ENSAIOS (EN)	EN 04	EN 08	EN 06
Amostras	A3-1/3	A3-2/3	A3-3/3
CABO DE ENSAIO (CE)	CE-02	CE-03	CE-02
Total de $N \times 10^6$ ciclos de cada EN	1,73	1,93	1,82
Total de $N \times 10^6$ ciclos de cada CE	1,73	4,26	4,65

Quadro 3-10 – Resumo da quantidade de falhas de cada ensaio do GA-EI-A3-75°C

EN 04 1/3 75°C	Ciclos	EN 08 1/3 75°C	Ciclos	EN 06 3/3 75°C	Ciclos
1ª quebra	4,84E+05	1ª quebra	6,14E+05	1ª quebra	5,95E+05
2ª quebra	5,47E+05	2ª quebra	7,80E+05	2ª quebra	8,63E+05
3ª quebra	1,06E+06	3ª quebra	9,26E+05	3ª quebra	9,99E+05
4ª quebra	1,20E+06	4ª quebra	1,26E+06	4ª quebra	1,17E+06
5ª quebra	1,32E+06	5ª quebra	1,40E+06	5ª quebra	1,32E+06
6ª quebra	1,49E+06	6ª quebra	1,83E+06	6ª quebra	1,37E+06
7ª quebra	1,62E+06	7ª quebra	1,99E+06	7ª quebra	1,37E+06
8ª quebra	1,77E+06			8ª quebra	1,55E+06

3.6.3 Ensaios da Segunda Etapa (E2)

Um pequeno grupo de ensaios foram realizados, sendo que nesta etapa apenas um ponto de cada amplitude foi ensaiado, assim, foram realizados ensaios em temperatura de 21°C e em temperatura de 75°C, e foi verificado o comportamento apenas da primeira quebra. Esses ensaios foram realizados devido a primeira etapa E1 ter sido feito um estudo comparativo em temperatura ambiente com dados da literatura e com ensaios de lote diferentes, e com intuito de elucidar quaisquer dúvidas nos resultados. Desta forma foi construída uma curva experimental com apenas um ponto de forma exploratória (CIGRE, 2008).

3.6.3.1 Grupo de Amostras em temperatura de 21°C (E2-YBs-21°C)

Para compor a curva S-N em temperatura ambiente, foram realizados quatro ensaios o qual foi denominado de E2-YBs-21°C, os ensaios foram realizados no ano de 2018 e início de 2019, os quais foram aplicados a mesma metodologia utilizado nos ensaios da E1. Na foto da figura 3.42 é apresentado três amostras, um ensaiado com a amplitude de 0,87mm, nesta amplitude foram realizados dois ensaios, os ensaios EN-12-A1 e EN-13-A1, a única amplitude com dois ensaios(EN-12* não aparece na foto do grupo de ensaios), um na amplitude de 0,91mm que foi o EN-14-A2 e um para a amplitude de 1,01mm que foi o ensaio EN-15-A3, no quadro 3.11, pode se observar o resumo da quantidade de ciclos de cada ensaio e o total de ciclos de cada cabo de ensaio para os ensaios em temperatura de 21°C. Para as informações das falhas em cada ensaio, como a quantidade de ciclos e a quantidade de falhas nos ensaios, pode ser visualizada no quadro 3.12. Embora tendo o critério de parada com a falha de apenas um fio, em alguns ensaios houve mais quebras, conforme quadro



Figura 3-42 - Grupo de amostras com YBs de 0,87, 0,91 e 1,01 mm, do GA-E2-YBs-21°C.

Quadro 3-11 - Resumo do GA-E2-YBs-21°C, quantidade de ciclos de cada cabo de ensaio e ensaio

ENSAIOS (EN)	EN 12*	EN 13	EN 14	EN 15
Amostras (YB em mm)	A1 0,87	A1 0,87	A2 0,91	A3 1,01
CABO DE ENSAIO (CE)	CE04	CE05	CE05	CE05
Total de $N \times 10^6$ ciclos no EN	2,53 (3 ^a)	1,2 (1 ^a)	1,2 (2 ^a)	0,7 (3 ^a)
Total de $N \times 10^6$ ciclos no CE	7,73	1,2	2,4	3,1

Quadro 3-12 – Resumo da quantidade de falhas de cada ensaio do GA-E2-YBs-21°C

EN 12 A1 21°C	Ciclos	EN 13 A1 21°C	Ciclos	EN 014 A2 21°C	Ciclos	EN 15 A3 21°C	Ciclos
1 ^a quebra	1,25E+06	1 ^a quebra	1,17E+06	1 ^a quebra	7,26E+05	1 ^a quebra	6,10E+05
2 ^a quebra	1,43E+06			2 ^a quebra	9,40E+05		
3 ^a quebra	1,51E+06			3 ^a quebra	9,49E+05		
				4 ^a quebra	1,04E+06		

3.6.3.2 Grupo de Amostras em temperatura de 21°C (E2-YBs-75°C)

Aqui serão apresentados o grupo de amostra para compor a curva S–N para temperatura de 75°C, foram os ensaios EN-16-A1-75°C, EN-18-A2-75°C e EN-05-A3-75°C, que constitui o grupo de amostra da E2-YBs-75°C, conforme pode ser visualizado na foto da figura 3.43, neste grupo de ensaio, também foi estabelecido o critério de parada de uma quebra (CIGRE, 2008), o quadro 3.13 apresenta o resumo sobre os ensaios realizados neste grupo, assim como quantidade de ciclos de cada ensaio, e a quantidade de ciclos do cabo usado para extrair as amostras. São apresentados no quadro 3.14, o resumo da quantidade de ciclos para cada falha

de todos os ensaios realizados neste grupo, em algumas amostras tiveram mais que uma quebra registrada, embora o critério de parada fosse apenas uma falha, isso se dá pelo fato do processo ser experimental e não ser automatizado.



Figura 3-43 - Grupo de amostras com YBs de 0,87, 0,91 e 1,01 mm, do GA-E2-YBs-75°C

Quadro 3-13 – Resumo do GA-E2-YBs-75°C, quantidade de ciclos de cada CE, e EN

ENSAIOS (EN)	EN 16	EN 18	EN 05
Amostras (YB em mm)	A1 0,87	A2 0,91	A3 1,01
CABO DE ENSAIO (CE)	CE04	CE05	CE02
Total de $N \times 10^6$ ciclos no EN	1,2 (1ª)	1,4 (3ª)	1,0 (2ª)
Total de $N \times 10^6$ ciclos no CE	1,2	4,6	2,7

Quadro 3-14 – Resumo da quantidade de falhas de cada ensaio do GA-E2-YBs-75°C

EN 16 A1 75°C	Ciclos	EN 18 A2 75°C	Ciclos	EN 05 A3 75°C	Ciclos
1ª quebra	1,03E+06	1ª quebra	0,67E+06	1ª quebra	5,85E+05
2ª quebra	1,96E+06			2ª quebra	8,50E+05
				3ª quebra	8,67E+05

CAPÍTULO VI

4 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados obtidos no programa experimental que consistiu no ensaio de resistência em fadiga sob o efeito da temperatura, conforme descrito no capítulo 3. Ao todo foram realizados 18 ensaios, sendo 14 ensaios sob temperatura de 75°C e 4 ensaios em temperatura ambiente.

A curva S-N será gerada mantendo-se a tensão constante no condutor no UPC entre o condutor e o grampo de suspensão. A quebra dos fios do condutor foi monitorada, e registrando o número de ciclos. Os ensaios de fadiga sob temperatura, também se concentraram na montagem do grampo de suspensão com o cabo, já que esta é a zona crítica do sistema de montagem cabo/grampo (EPRI, 2006).

Para a composição da curva *S-N*, sob o efeito da temperatura, foi utilizado CE aleatórios para compor cada grupo de amostras, entretanto, seguindo sempre a mesma metodologia e considerando a particularidade de cada ensaio, conforme instrumentação realizada e descrita no capítulo 3.0, e memorial de ensaio no Apêndice C, onde foram expostos o comportamento de cada ensaio durante sua execução.

Nestes ensaios, a vida de fadiga dos condutores foi determinada em função das medidas de intensidade de vibração, uma vez que as tensões responsáveis pela falha por fadiga no ponto crítico são difíceis de avaliar. No entanto, a intensidade de vibração está correlacionada com a tensão por meio da fórmula de *P-S*. Assim, a curva S-N foi estabelecida repetindo os três ensaios para cada amplitude de tensão expressa em termos de amplitude de vibração a 89 mm do UPC entre o condutor e o grampo de suspensão, *Yb*. Todos os testes de fadiga neste trabalho foram rigorosamente conduzidos de acordo com as especificações do CIGRÉ (1985), EPRI (2006) e IEEE (1966). A vida de fadiga do cabo/grampo foi obtida usando o critério associado ao rompimento de 10% do número de fios de alumínio, conforme recomendado por CIGRÉ (1985). Curvas *S-N* foram geradas usando três valores diferentes de *Yb* para o H/W de 1820m.

Os valores foram parametrizados de acordo com os ensaios realizados na Universidade de Brasília do cabo Orchid, para fins comparativos, além disso, esses valores foram escolhidos de acordo que a execução dos ensaios fosse viável em termos de tempo e disponibilidade das

bancadas do laboratório. Com resultados relevantes em termos de dados para o projeto de fadiga ou cálculo de vida residual de linhas reais.

Assim, a partir do cálculo da constante de P-S (K) para o valor de H / w de 1820 m, as três amplitudes de deslocamento (Yb) foram utilizadas neste estudo para gerar a tensão de flexão no UPC de 26,80, 28,22 e 31,35 Mpa. Posteriormente, essas tensões de flexão calculadas foram comparadas às tensões medidas durante os ensaios usando *strain gages* colados no ponto diametralmente oposto ao UPC, o comportamento da tensão forma plotadas em gráficos em função do tempo.

Também serão realizados os comparativos com a curva $S-N$ já publicada dos ensaios realizados em temperatura ambiente (Badibanga, 2017), juntamente será apresentada análise de falhas em termos dos tipos de quebras, morfologia e a distância de ocorrência a partir da abertura do grampo de suspensão. Além disso, é apresentado um estudo sobre a ocorrência das quebras, ou seja, o mapeamento das posições das quebras em relação à posição do CE em relação ao grampo de ancoragem.

Por fim, serão apresentadas as curvas $S-N$ e suas comparações, incluindo a comparação com a curva padrão da CIGRE, *Safe Border Line* (CSBL), na mensuração da vida útil do cabo, onde será apresentada a discussão da influência da temperatura sobre a durabilidade do condutor.

4.1 TESTE DINÂMICO

A primeira parte apresenta os resultados e discussões das medições de *strain gauge* para avaliar experimentalmente a fórmula de P-S e a correlação entre a amplitude de flexão a 89 mm (Yb) e a tensão de flexão nos três fios condutores superiores no ponto diametralmente oposto do último ponto de contato (UPC) entre o condutor e o grampo. É apresentado o comportamento da tensão calculada experimentalmente em todo o decorrer de cada ensaio, assim o comportamento dos resultados do *strain gauge* serão apresentados sob a carga dinâmica dos condutores, e serão apresentados durante o ensaio de fadiga sob temperatura de 75°C e em temperatura ambiente. A fórmula de $P-S$ em termos da amplitude de flexão dos condutores medidos a uma distância de 89 mm da UPC entre o condutor e o grampo de suspensão (Yb) foi verificada durante os experimentos. As respostas dinâmicas obtidas dos ensaios foram realizadas. A média das tensões medidas em cada ensaio foi levada em consideração para o cálculo da tensão de P-S experimental usando a equação 2-1.

4.1.1 Resultados para Carregamento Dinâmico

Nesta seção serão apresentados os resultados dos ensaios dinâmicos, obtidos através do uso dos extensômetros, para os quais foram avaliados o efeito da amplitude de excitação, para as duas condições de ensaios. Sendo assim, foi feita uma avaliação da fórmula de P-S, para os três deslocamentos Y_b . Os valores incluídos nos gráficos são os resultados da média dos ensaios dinâmicos. Os valores em temperatura ambiente foram retirados da literatura (Badibanga, 2017). Os resultados em 75°C foram obtidos através dos três extensômetros colados nos fios do CE diametralmente opostos ao UPC, entre o condutor e o grampo de suspensão, com temperatura constante de 75°C . Os resultados foram obtidos através dos valores da média dos três extensômetros de topo. A tabela 4.1, apresenta os valores da média para cada ensaio das tensões experimentais da tensão de flexão no UPC entre o condutor e o grampo de suspensão, ensaio 75°C . A tabela 4.2 apresenta os resultados em temperatura ambiente extraído da literatura.

Tabela 4-1 – Tensão de flexão no UPC entre o condutor e o grampo de suspensão, 75°C

H/w (m) 1820	Ensaio	Amplitude Y_b (mm)	Tensão Calculada (MPa)	Tensão Experimental (MPa)	Erro (%)	Média
	EN-10_A1_1/3_75°C			26,55	0,93	
	EN-02_A1_2/3_75°C	0,87	26,80	25,02	6,64	26,43
	EN-09_A1_3/3_75°C			27,71	-3,40	
	EN-07_A2_1/3_75°C	0,91	28,22	28,88	-2,34	
75°C	EN-11_A2_2/3_75°C	0,91	28,22	29,75	-5,42	28,77
	EN-03_A2_3/3_75°C	0,91	28,22	27,68	1,91	
	EN-04_A3_1/3_75°C	1,01	31,35	30,45	2,87	
	EN-08_A3_2/3_75°C	1,01	31,35	33,96	-8,33	32,72
	EN-06_A3_3/3_75°C	1,01	31,35	33,74	-7,62	

Tabela 4-2 – Tensão de flexão no UPC entre o condutor e o grampo de suspensão, Amb

H/w (m) 1820	Ensaio	Amplitude Y_b (mm)	Tensão Calculada (MPa)	Tensão Experimental (MPa)	Erro (%)	Média
Temperatura Ambiente	1	0,87	26,80	26,95	0,56	
	2	0,87	26,80	25,43	5,11	27,02
	3	0,87	26,80	28,69	-7,05	
	1	0,91	28,22	27,50	2,55	
	2	0,91	28,22	25,95	8,04	27,11
	3	0,91	28,22	27,88	1,20	
	1	1,01	31,35	31,41	0,19	
	2	1,01	31,35	30,67	2,17	30,34
	3	1,01	31,35	28,94	7,69	

A figura 4.1 e figura 4.2 apresenta a tensão de flexão versus amplitude de flexão do valor experimental calculado usando a fórmula de P-S. As respostas dinâmicas de tensões obtidas dos ensaios submetidos à temperatura de 75°C e ambiente respectivamente, e apresentam as respostas dinâmicas obtidas dos ensaios usando os deslocamentos de flexões definidos, em todos os ensaios os valores comparados foram próximos entre os ensaios em temperatura ambiente e em 75°C.

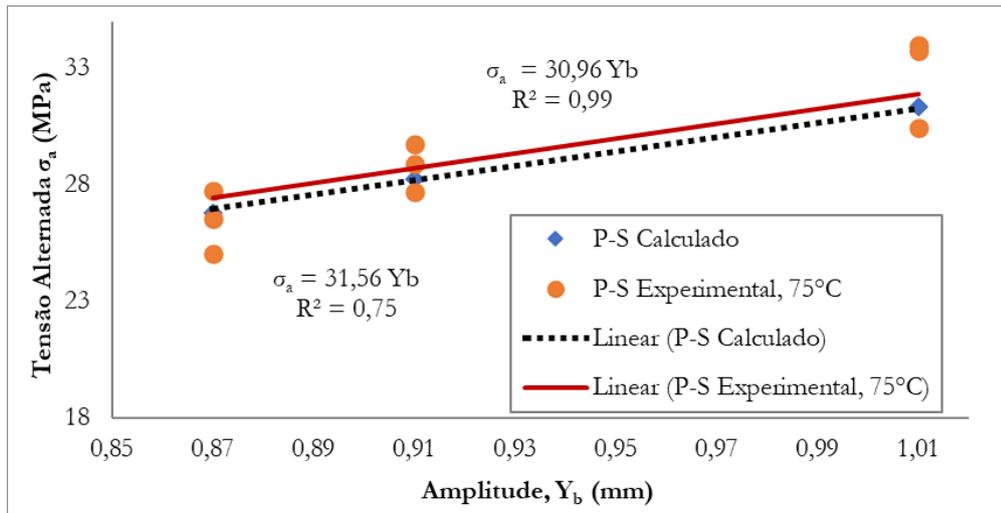


Figura 4-1 – Comparação entre valores experimental e calculado usando P-S, 75°C

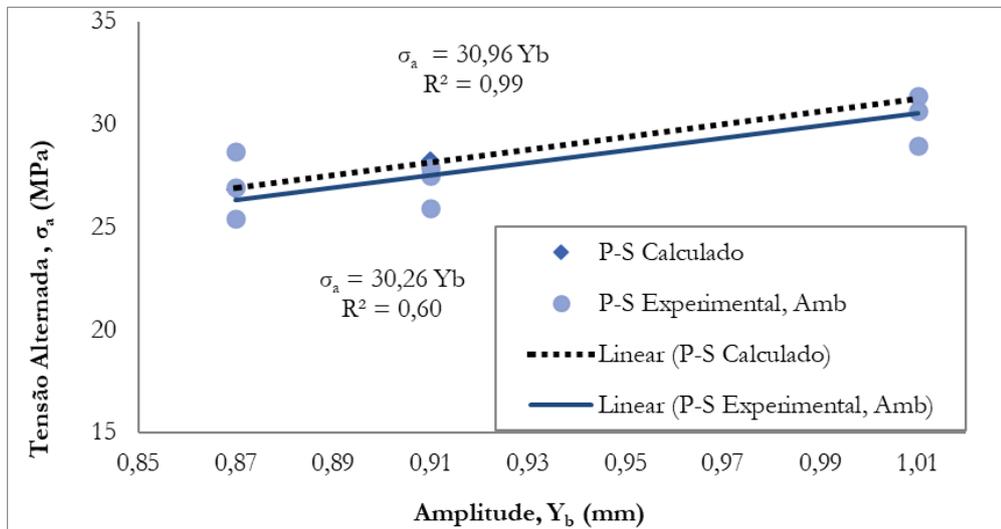


Figura 4-2– Comparação entre valores experimental e calculado usando P-S, Amb

Os gráficos apresentados nas figuras 4.3 e 4.4 apresentam a tensão de flexão medida usando os extensômetros e apresentaram boa concordância relacionada ao deslocamento de flexão (pico a pico) imposto a uma distância de 89 mm do UPC, e estão em concordância com os

valores apresentados nos ensaios realizados em temperatura ambiente. Para todas as medidas de tensão de flexão, o deslocamento de flexão (Y_b) aumentou proporcionalmente com a tensão de flexão. Os dados desses experimentos são consistentes com os valores previstos para todos os ensaios testados, com bons coeficientes de correlação de 0,75 para os ensaios em temperatura ambiente foi de 0,60.

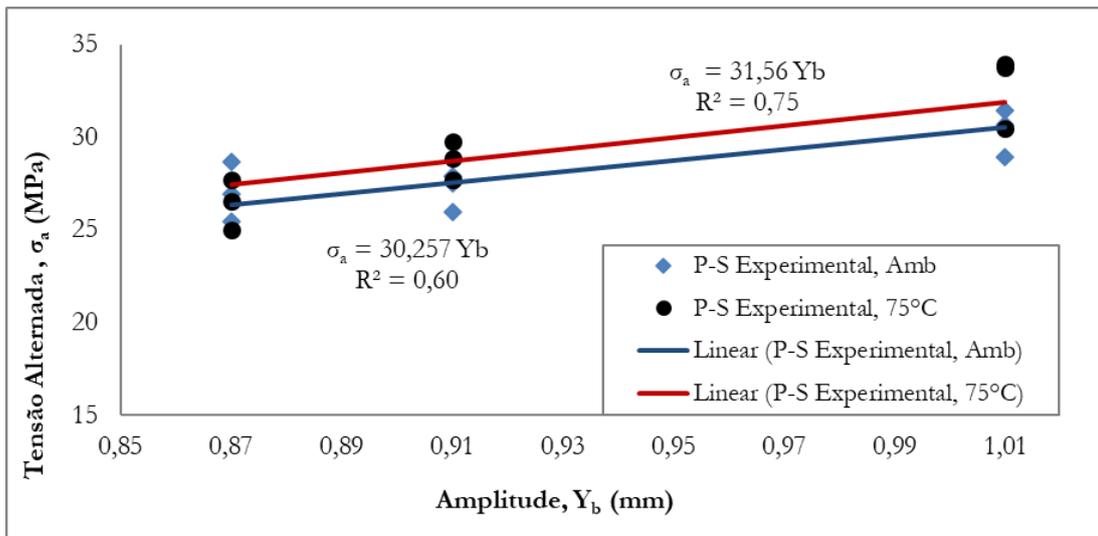


Figura 4-3 – Comparação entre valores de P-S em 75°C e temp Amb

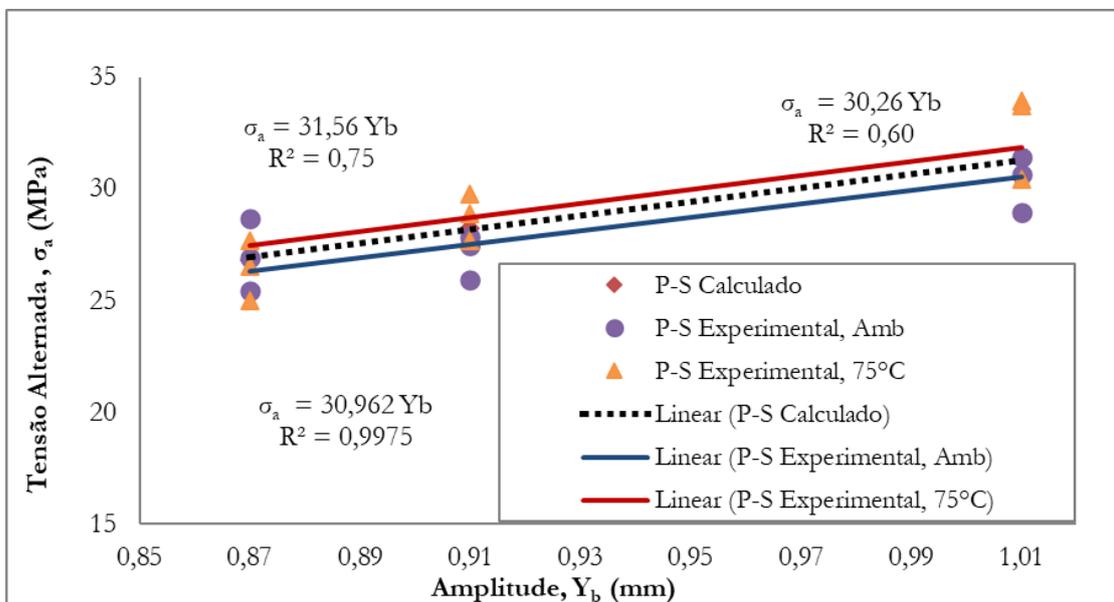


Figura 4-4 – Comparação entre valores experimental e calculado usando P-S, 75°C

A fórmula de Poffenberger-Swart correlacionou-se bem com os ensaios testados para os deslocamentos de flexão usados, comportando-se no início dos ensaios como descrito em (Poffenberger; Swart, 1965) entretanto, há fortes indícios de que este comportamento tende a

mudar após a evolução do ensaio em função do tempo, assim, este ponto poderia ser melhor analisado com mais detalhes, para os diferentes deslocamentos de flexão.

Foi verificado a porcentagem de erro em cada grupo de ensaio, o erro médio entre os resultados da tensão teórica com a tensão experimental para os deslocamentos supracitados. A figura 4.5 apresenta os erros para os ensaios nas temperaturas de 75°C e ambiente respectivamente. Os ensaios apresentaram desvios relativos dentro da faixa de tolerância nas condições de ensaio para as duas temperaturas os erros mais considerados apresentados foram de -8,33 % a - 7,62 % para temperatura de 75°C e -7,05 % a 8,05 % para temperatura ambiente.

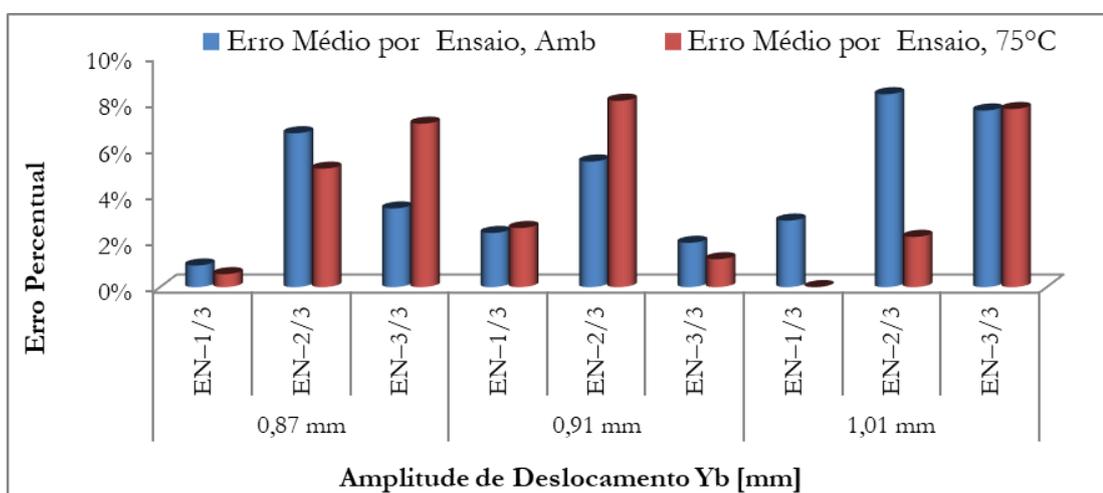


Figura 4-5 – Erro médio entre os resultados da tensão teórica x tensão experimental

Os erros percentuais da figura 4.6 foram plotados os valores para as porcentagens em módulo para todos os ensaios da curva S-N da E1. Entretanto, na tabela 4.1 e 4.2 é possível verificar todos os valores reais da média dos erros medidos durante os ensaios dinâmicos. Na figura 4.6 apresenta a média dos ensaios para as três amplitudes ensaiadas, pode-se observar que a média se manteve abaixo de 4% para ambas as temperaturas de ensaio. (média calculada em valores absolutos).

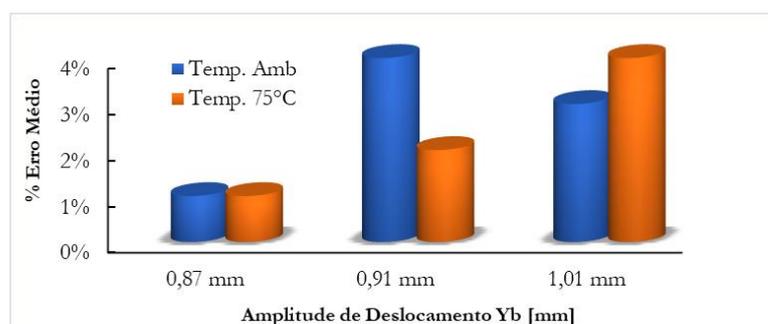


Figura 4-6 – Erro médio entre os resultados da tensão teórica x tensão experimental.

4.2 RESULTADOS DA CURVA S–N, COM TEMPERATURA CONTROLADA

Tendo sempre a operação segura dos equipamentos de modo a preservar o equipamento de laboratório, os 18 ensaios de fadiga foram realizados na faixa de frequências entre 16 a 24 Hz, operando na região ótima de trabalho do shake. A escolha da frequência mais adequada para condução do ensaio baseia-se em um ensaio prévio de varredura das frequências de ressonância do sistema, descrita na seção da 3.4 do capítulo da metodologia.

Na primeira etapa de ensaios (E1) foi mantido o critério para parada, utilizado no trabalho de (Badibanga, 2017) estabelecido pela CIGRE (1979) que considera a falha como sendo o maior valor dentre duas opções: a) a ruptura de 10% do número de fios de alumínio do cabo, ou, b) a ruptura de 4 fios. Assim, embora este critério tenha sido observado em alguns casos, optou-se por deixar o ensaio continuar até atingir a estatística da média ensaiada nos ensaios publicados para o cabo Orchid. Tendo como objetivo fazer a comparação até a quarta quebra, de modo a permitir a comparação com a curva CSBL e fazer um comparativo entre a quantidade das quebras nos dois casos pesquisados. Apesar das 4 falhas dos fios ser critério de parada do ensaio, após completar a estatística, o ensaio era interrompido, mesmo não havendo o registro evidente de 4 rupturas.

A segunda etapa (E2) dos ensaios considerou-se o critério apresentado da nova proposta da CIGRE de 2008, que define a ruptura de apenas 1 fio de alumínio como critério de parada do ensaio. Para esta etapa de ensaios, os ensaios foram realizados considerando apenas um ensaio para cada amplitude Y_b , três pontos em temperatura ambiente, e três pontos em temperatura de 75°C, (só para a amplitude de 0,87mm foram dois ensaios). Curva S–N comparativa, em temperatura ambiente e 75°C, ensaios da E1

Para os dados comparativos em temperatura ambiente, conforme supracitado os dados foram retirados da literatura para a curva do cabo Ochid. Para os ensaios de fadiga sob o efeito da temperatura de 75°C, com início após o ensaio dinâmico de validação. Apesar de usar uma nova metodologia para detecção de quebras utilizando extensômetros, também foi usada a metodologia de detecção de quebras usadas no laboratório para efeito comparativo. Em todos os ensaios de fadiga, o gráfico de rotação da régua versus o número do ciclo decorrido foi gerado.

Durante os ensaios de fadiga sob o efeito da temperatura, os fios da camada externa do condutor foram monitorados e observados através de linhas desenhadas antes do teste de fadiga

ao redor do CE entre o acelerômetro no ponto 89 mm , e o UPC. A figura 4.7 ilustra as duas linhas desenhadas ao do CE antes do teste de fadiga figura 4.7 a), e quando ocorre a quebra do fio externo, quando as linhas desenhadas se movem devido à carga de tração no condutor a figura 4.7 b), ilustra a ocorrência da quebra externa no fio. No final do teste de fadiga, a amostra foi retirada, e a quebra pode ser confirmada. Estas observações corroboram com a identificação das quebras externas pelo método de identificação com o uso de extensômetros. Sendo assim, os resultados dos ensaios apresentam se os valores experimentais para as curvas nas duas condições de temperatura. Os ensaios de fadiga sob o efeito da temperatura de 75°C com o cabo condutor CA 636 MCM foram realizados no segundo semestre de 2018.

Dito isto, será apresentado o número de ciclos da primeira à quarta quebra dos fios do CE, por nível de tensão, com carga de esticamento de 1.620 Kgf ou 31% da carga de ruptura (RTS).

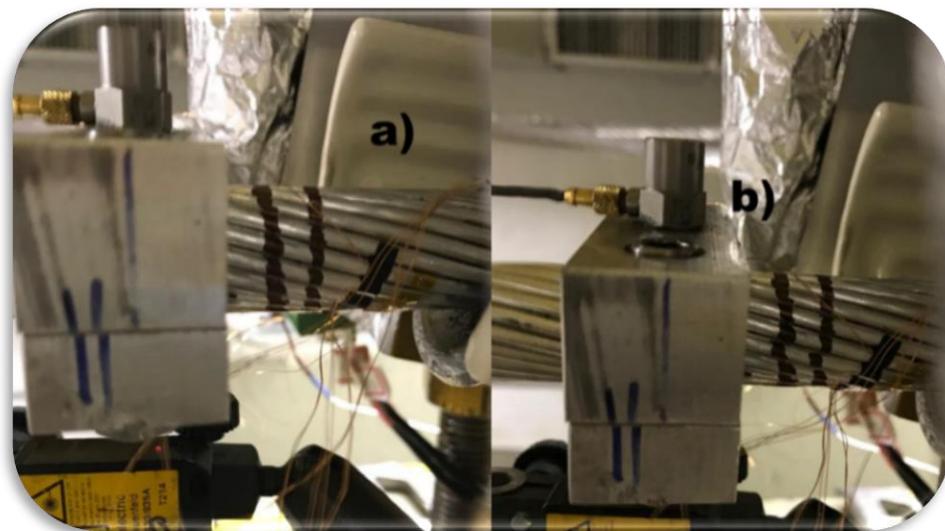


Figura 4-7 – Duas linhas feitas ao redor do CE entre o UPC e 89 mm , antes do teste de fadiga a), após identificação de quebra externa no fio b).

Para a construção da *curva S-N* sob a temperatura de 75°C , as mesmas condições de ensaio foram preservadas, para cada amplitude, houve a repetição de três ensaios. Os resultados dos testes de fadiga realizados à temperatura ambiente (a partir da referência (Badibanga, 2017) e os respectivos resultados obtidos dos ensaios realizados a uma temperatura de 75°C estão resumidos na tabela 4.3, nas duas primeiras colunas desta tabela são relatados, respectivamente, o deslocamento de amplitude pico a pico, Y_b , e a tensão P-S, σ_a usados nos ensaios, as colunas a seguir traz a quantidade de ciclos que ocorreu a primeira, segunda, terceira até a quarta

quebra. A partir dos dados experimentais gerados, foi possível traçar as curvas S-N considerando as duas temperaturas distintas para o CE, a tabela 4.4 apresenta a média para a relação da vida em fadiga para os ensaios realizados em temperatura ambiente e 75 °C.

Tabela 4-3 – Dados da evolução das falhas dos ensaios nas duas temperaturas

Y _b (mm)	σ _a P-S (MPa)	Quantidade de ciclos para falha, N (× 10 ⁶)							
		1 ^a quebra		2 ^a quebra		3 ^a quebra		4 ^a quebra	
		Amb	75 °C	Amb	75 °C	Amb	75 °C	Amb	75 °C
0,87	26,8	1.08	1.13	1.46	1.54	2.59	1.62	2.72	1.88
		1.34	0.97	1.66	1.35	2.56	2.21	2.96	2.89
		1.10	1.12	1.44	1.29	2.21	1.38	2.54	1.46
0,91	28,22	0.85	0.79	1.07	1.26	2.23	1.60	2.43	1.69
		0.85	0.70	1.07	1.28	2.27	1.35	2.70	1.83
		0.82	0.79	1.25	1.10	2.22	1.55	2.57	1.62
1,01	31,35	0.70	0.61	1.17	0.82	1.41	1.06	1.83	1.20
		0.80	0.61	1.24	0.78	1.47	0.93	1.77	1.26
		0.74	0.60	1.11	0.86	1.37	1.00	1.47	1.18

Os resultados dos ensaios são apresentados em gráficos com número de ciclos, para cada nível de tensão. As curvas de vida em fadiga foram construídas através de regressão linear utilizando a equação de *Basquin* ($y = Ax^b$). Aplica-se o método dos mínimos quadrados para determinar o melhor ajuste das constantes de *Basquin* *A* e *b* com os dados experimentais. A curva S–N foi construída e apresentada na figura 6-8, que relaciona a amplitude e a tensão alternada em *MPa*, calculada através da fórmula de P–S. Apresenta a quantidade de ciclos para a quebra do primeiro fio de alumínio, para os nove ensaios realizados sob o efeito da temperatura, juntamente com a curva S–N dos ensaios realizados em temperatura ambiente.

Tabela 4-4 – Relação de vida considerando o número médio de ciclos para a 1^o e o 4^o quebra

Critério de Falha	σ _a (MPa)	Número médio de ciclos por falha		$\frac{N_{75^\circ\text{C}}}{N_{\text{Amb}}}$
		N _{Amb}	N _{75°C}	
	28,22	8.41E+05	7.59E+05	0,90
	31,35	7.48E+05	6.06E+05	0,81
4 ^a quebra	26,80	2.74E+06	2.08E+06	0,76
	28,22	2.57E+06	1.71E+06	0,67
	31,35	1.69E+06	1.21E+06	0,72

Pode-se perceber que houve um deslocamento da curva $S-N$ dos ensaios em temperatura de 75°C , principalmente para a maior amplitude, entretanto para a amplitude de $0,87\text{ mm}$, os resultados foram menos expressivos. Portanto, para a determinação de uma curva de fadiga consistente é necessário fazer o controle da EDS, amplitude de deslocamento e do posicionamento dos sensores utilizados para medir o deslocamento do cabo. Caso alguns destes parâmetros não tenham um rigor necessário, a dispersão dos resultados pode ser alta.

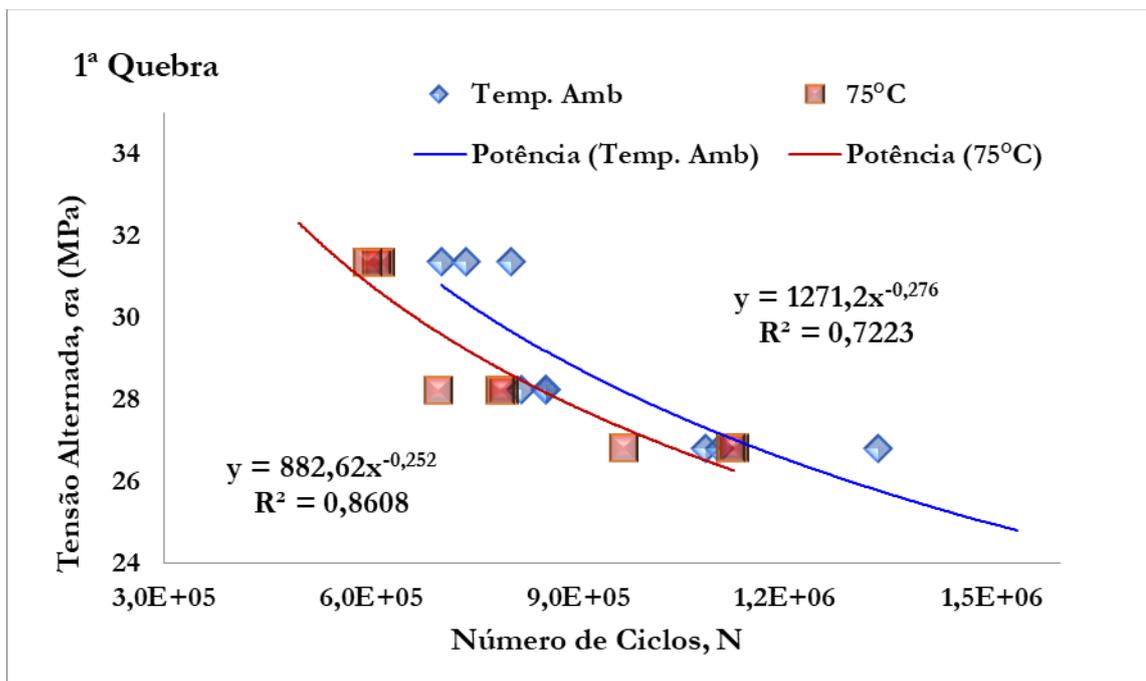


Figura 4-8 – Curva $S-N$, comparação para a primeira quebra, três pontos

Nota-se que as curvas de potência representaram de forma aceitável a distribuição dos pontos. Para a melhor visualização, no gráfico da figura 4-9 são apresentadas as curvas $S-N$ para os resultados da média dos pontos para a primeira quebra. Cada ponto apresentado no gráfico foi obtido através da média aritmética dos três ensaios para cada amplitude, o que confirma o deslocamento abaixo da curva $S-N$ em temperatura ambiente.

Após o levantamento da curva em temperatura de 75°C , nota-se que o ajuste dos pontos experimentais, por meio de curvas de potência, foi satisfatório. Isto é observado através do valor do R^2 (coeficiente de determinação de Pearson), das equações apresentadas das curvas, quanto mais próximo de “1”, melhor é o ajuste nas curvas aos pontos experimentais.

Além disso, é possível observar que a curva com temperatura de 75°C apresentou um número de ciclos inferior ao das curvas em temperatura ambiente, ou seja, nota-se que o

aumento da temperatura, para os dados comparativos já publicados, apresenta uma redução de forma significativa à resistência em fadiga do cabo. Entretanto, nesta análise preliminar não é possível afirmar, que apenas a temperatura influenciou os resultados.

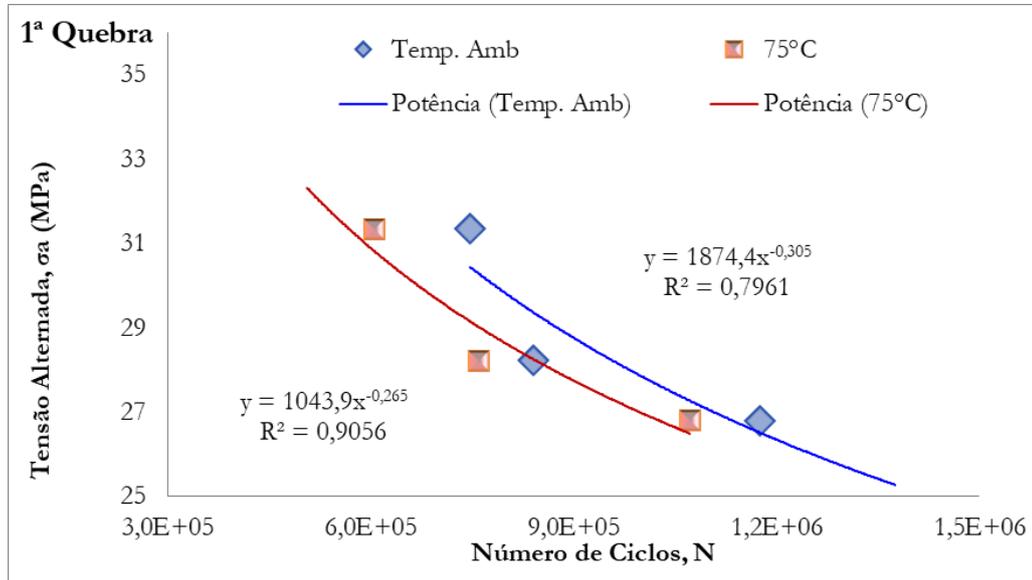


Figura 4-9 – Comparação nas curvas S – N, para a média para primeira quebra

Para comparar a previsão de vida dos ensaios de fadiga do cabo Orchid, será adotado a curva padrão (CSBL), na forma simplificada, dito isto, as comparações foram realizadas, para o comportamento da quarta quebra, o que indicou um deslocamento mais homogêneo da curva S – N, entretanto, continuou abaixo da curva dos ensaios realizado em temperatura ambiente e acima da curva limite de segurança da CIGRE.

O gráfico da figura 4.10 ilustra os três pontos para cada amplitude ensaiada e a figura 4.11 apresenta o ponto no gráfico obtido através da média aritmética dos três ensaios para cada amplitude, nas duas temperaturas de ensaio, e mostrou um bom ajuste das curvas dos pontos experimentais. Considerando os resultados experimentais dos ensaios em temperatura de 75°C, a equação que melhor descreve a relação entre a tensão estimada pela equação de P – S e o número de ciclos necessário para a falha por fadiga do quarto fio é apresentada pela equação (3)

$$\sigma_a = 1903,1^{-0,293} \quad (3)$$

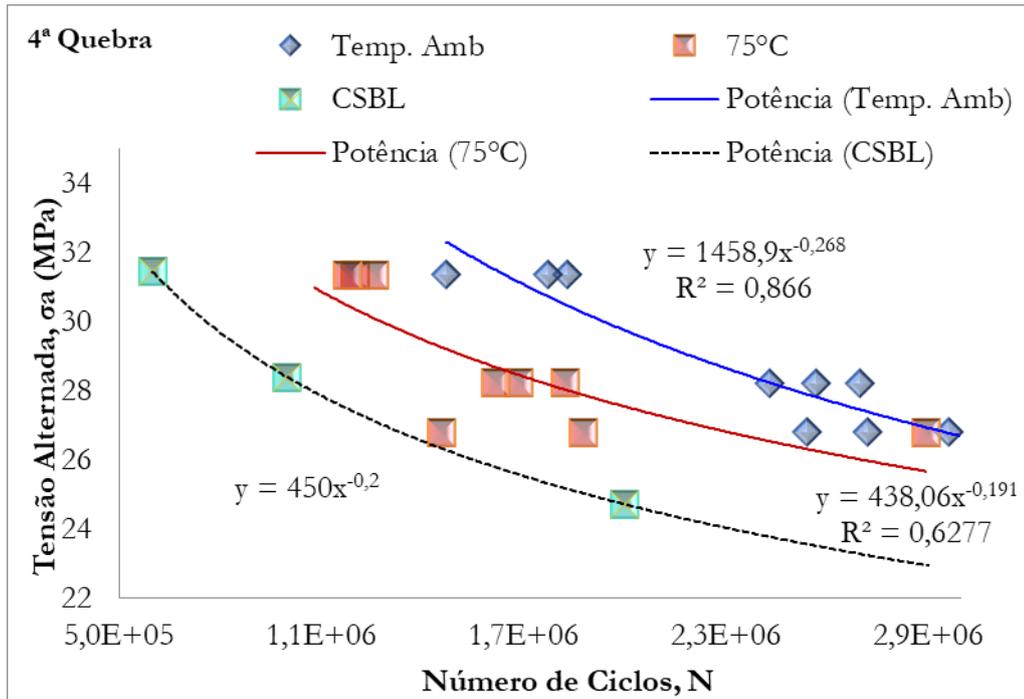


Figura 4-10 – Curva S-N das temperaturas ensaiadas, comparação com (CSBL) da CIGRE

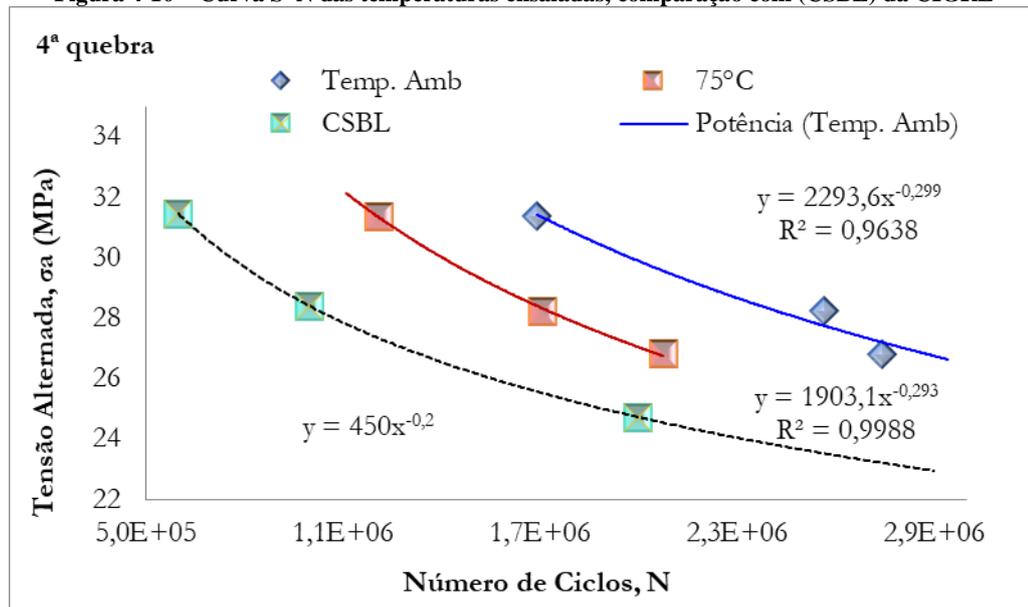


Figura 4-11 – Comparação da média para a Curva S-N, e comparação com a CSBL da CIGRE

Da figura 4.8 a figura 4.11, apresentam as comparações entre as curvas S-N do cabo Orchid testado à temperatura ambiente e 75 ° C, considerando como a comparação das falhas para a 1ª e 4ª falha, respectivamente, baseado nos dados apresentados. Na curva para a primeira falha mostra um pequeno deslocamento para a esquerda da curva S-N obtida para os ensaios a 75 ° C, e é observado o comportamento mais evidente para o maior nível de tensão de (31,35 MPa). O

que representa uma pequena diminuição na vida em fadiga em relação à curva $S-N$ à temperatura ambiente, (figuras 4.8 e 4.9). No entanto, em uma análise qualitativa das curvas $S-N$ geradas considerando a quarta quebra (figuras 4.10 e 4.11) revelaram que a vida em fadiga é significativamente afetada pelo aumento da temperatura do condutor, independentemente do nível de estresse $P-S$ utilizado. Para quantificar essas tendências, é apresentado na tabela 4.4 que relata a relação de vida em fadiga dos ensaios e temperatura ambiente (dados retirados da literatura) e ensaios realizados em e $75^{\circ}C$. Verifica-se que a vida do condutor é reduzida em média 10% considerando a primeira falha e 30% considerando a quarta falha. Esses resultados indicam uma pequena diminuição da vida útil do cabo quando submetido a uma temperatura constante de $75^{\circ}C$, esses resultados podem ter sido influenciados pela temperatura e também por outros fatores, tais como o aperto no cabo grampo, o escorregamento dos fios, e o atrito entre eles.

4.2.1 Curva SN, em temperatura de $21^{\circ}C$ e $75^{\circ}C$ para os ensaios da E2

Para os resultados deste grupo de ensaios, para a construção da curva $S-N$ de apenas um ensaio para cada amplitude para o cabo Ochid, sendo quatro realizados em temperatura ambiente e três em temperatura de $75^{\circ}C$. Sendo assim, para estes resultados denominados de segunda etapa (E2) considerou-se o critério de parada a ruptura de apenas o primeiro fio de alumínio (CIGRE de 2008).

Para quantificar os resultados é apresentado na tabela 4.5 a quantidade de ciclos para a primeira quebra do fio do CE, para os ensaios realizados em $21^{\circ}C$ e $75^{\circ}C$, na tabela traz o nível de tensão, e a carga de esticamento permaneceu de 1.620 Kg ou 31% da carga de ruptura (RTS), para as duas condições de temperatura ensaiadas.

A figura 4.12 ilustra os resultados comparativo para a primeira quebra. Em uma análise qualitativa das curvas $S-N$ geradas para apenas um ponto para cada amplitude ensaiada e considerando a primeira quebra. Pode se observar que os resultados supracitados em 4.2 corroborando com os resultados apresentados na E2, e apresenta uma redução média de 9% para as três amplitudes ensaiadas, e que a vida do condutor é reduzida em média 15%, 5% e 7% para as amplitudes de $0,87\text{ mm}$, $0,91\text{ mm}$ e $1,01\text{ mm}$ respectivamente, considerando a primeira quebra e o aumento da temperatura.

Tabela 4-5 – Ensaios E2, nas temperaturas de 21°C e 75°C.

Y _b (mm)	σ _a P-S (MPa)	Número médio de ciclos para falha		$\frac{N_{75^\circ\text{C}}}{N_{21^\circ\text{C}}}$
		ENSAIOS	1ª quebra [Ciclos]	
0,87 mm	26,80	EN-12-A ₁ -21°C	1,25E+06	0.85
		EN-13-A ₁ -21°C	1,17E+06	
		EN-16-A ₁ -75°C	1,03E+06	
0,91 mm	28,22	EN-14-A ₂ -21°C	7,26E+05	0.95
		EN-18-A ₂ -75°C	6,98E+05	
1,01 mm	31,35	EN-15-A ₃ -21°C	6,24E+05	0.93
		EN-05-A ₃ -75°C	5,85E+05	

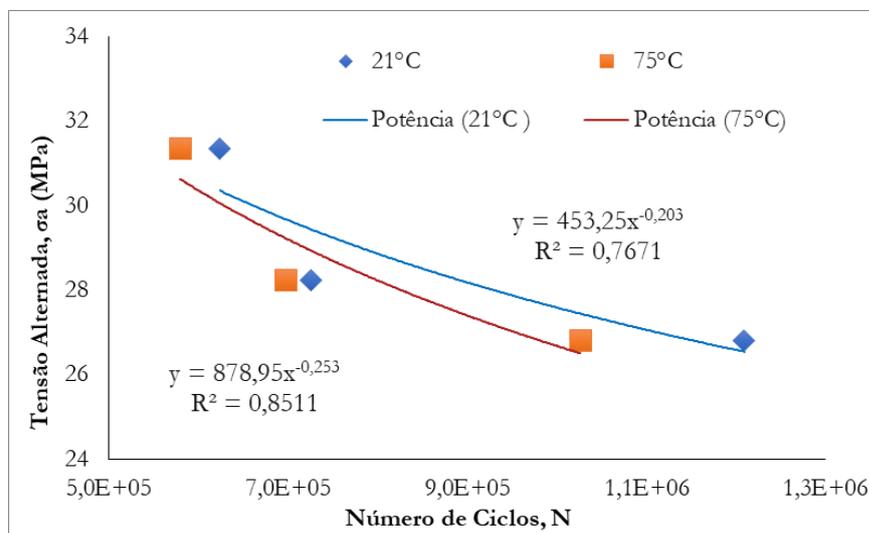


Figura 4-12 – Comparação das curvas S – N, para primeira quebra

4.3 ANÁLISE DAS FALHAS

Nesta seção serão apresentados os resultados e análise das falhas dos ensaios de fadiga realizados nesta tese. Primeiramente são apresentados o mapeamento de todas as quebras obtidas nos ensaios realizados para compor os resultados desta pesquisa. Logo na sequência, será apresentado o estudo comparativo entre os resultados obtidos e algumas amostras resgatadas do grupo de ensaio realizado em 2017 e publicados por (Badibanga, 2017). Sendo assim, o mapeamento das falhas considera alguns aspectos principais, sendo a posição de ocorrência da falha, tendo referência à abertura do grampo de suspensão (boca do grampo), e o registro da ocorrência da quebra segundo camada se é externa ou interna, considerando apenas análises macroscópicas.

Nestas análises será realizado o mapeamento da posição e da ordem de ocorrência das falhas. Para realizar o mapeamento das falhas e executar a análise foi dividida em três grupos:

- i) Quais fios romperam, e a quantidade de fios rompidos durante cada ensaio.
- ii) A posição (distância) em que ocorreu a falha no fio a partir da abertura do grampo de suspensão em relação à camada do *CE*.
- iii) Identificação como interna ou externa.
- iv) O perfil da falha

4.3.1 Padrão de ocorrências das quebras nos fios dos grupos *E1* e *E2*

Em todos os ensaios, pode se observar um comportamento padrão para as ocorrências das quebras dos fios, nesta seção será descrito quais fios quebraram com mais frequência para ambos os tipos de temperatura de ensaio. Nesta análise foi observado o grupo de fios que quebram, de todos os ensaios realizados neste trabalho. Estes fios estão demarcados nas áreas em vermelho na figura 4.13, os quais os fios do CE foram mapeados de acordo com a nomenclatura indicada, seguindo a mesma nomenclatura adotada no capítulo 3.0. As quebras na região demarcada também foram observadas nos ensaios realizados em temperatura ambiente.

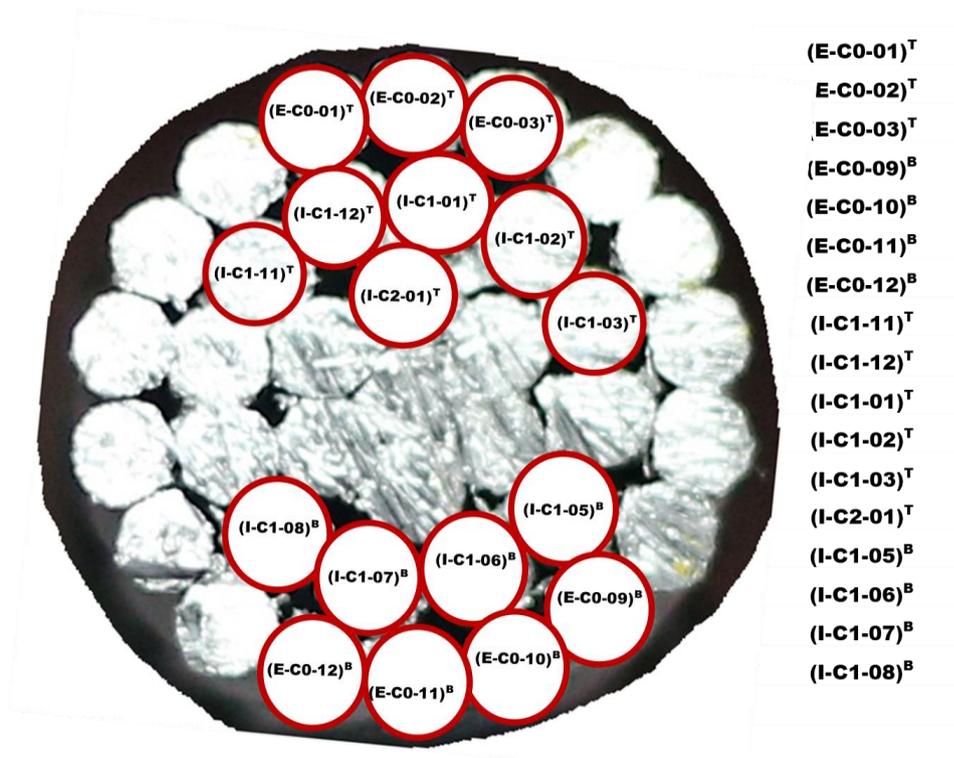


Figura 4-13 – Mapeamento dos fios no cabo de ensaio (CE)

De forma que, quando a quebra ocorreu em algum fio da parte superior do cabo em relação ao grampo de suspensão, foi indicada como Topo (T). Caso a quebra tenha ocorrido na parte inferior do cabo, foi indicada com base (B). A figura 4.14, apresenta a configuração dos três extensômetros colados no topo e quatro extensômetro de base no CE, que são as duas regiões que ocorrem as quebras externas. Todas as quebras foram observadas em quatro regiões distintas, duas externas e duas internas. Neste propósito, os fios foram nomeados, começando sempre pelos fios do topo, onde são colados os extensômetros para fazer a verificação da tensão média dos ensaios. Desta forma, os fios externos tiveram uma nomenclatura conforme previamente estabelecida na metodologia de E-C0 para a camada externa, e foram observadas algumas incidências de quebras destes fios, que foram os; E-C0-01, E-C0-02, E-C0-03, sendo considerados os três fios de topo, diametralmente oposto ao UPC. Da mesma forma, para os fios da base as incidências ocorreram nos fios denominados de; E-C0-12, E- C0-11, E-C0-10 e E-C0-09.

Os fios de base interno acompanham a ordem estabelecidas pelos fios de topo. Objetivando facilitação na identificação dos padrões das quebras e realizar as leituras de repetição. Foi mantido a mesma nomenclatura para as camadas internas. Sendo I-C1, para as quebras da primeira camada interna e I-C2 para a segunda camada interna, assim, os fios internos do topo que se romperam nos ensaios foram; I-C1-11, I-C1-12, I-C1-01, I-C1-02, I-C1-03 e I-C2-01. A figura 4.14, apresenta as duas regiões das quebras internas, sendo uma no topo no detalhe aumentado e a outra na base. No detalhe da figura 4.14, aparecem os fios I-C1-07 e I-C1-06 internos da base da amostra.

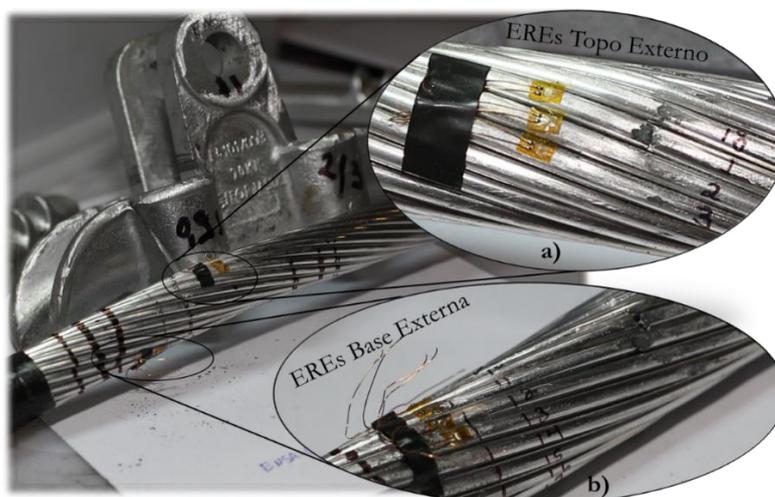


Figura 4-14 – Sistema de numeração dos fios externos de topo e base, no detalhe aumentado posição da colagem dos extensômetros.

É possível observar que o fio número dois (I-C1-02) da camada interna do topo, no detalhe da figura 4.15, coincide com o segundo fio externo, chamado de E-C0-02, a numeração foi estabelecida no sentido horário para todas as camadas. O padrão para nomenclaturas dos fios na base da camada interna também foi mantido, os fios que romperam nos ensaios foram; I-C1-08, I-C1-07, I-C1-06 e I-C1-05.

É notório nas duas figuras, o sistema adotado de numeração dos fios, começando com o número um sempre para o primeiro fio do topo esquerdo externo, seguindo em sentido horário para a numeração dos demais fios até o último número de fio que é o dezoito. Já para a camada interna foi do número um até o número doze. Como a numeração dos fios foram estabelecidas de acordo com os três fios de topo, a posição dos fios mudava a cada ensaio, devido a acomodação do CE no grampo. A ideia é mapear as tendências para as quebras a fim de fornecer dados para predição numérica para os primeiros fios rompidos.



Figura 4-15 – Sistema de numeração dos fios internos de topo interno a) e base interna b)

4.3.2 Mapeamento das quebras dos fios nos ensaios em temperatura de 75°C

Para esta análise foi realizado o mapeamento de todas as quebras ocorridas nos fios, isto foi feito a fim de verificar se os fios quebram de forma aleatória ou a tendência é repetir a posição das quebras. A ideia é fazer um mapeamento dos fios que quebram com mais frequência nos ensaios. O que se observou é que existem fios específicos, que as falhas ocorrem, as duas áreas apresentadas dos fios pode ser observadas na figura 4.13 onde esses fios são circulos nas duas

regiões, e a partir desse mapeamento, com conhecimento dos fios de maior incidência das falhas, será possível prever as primeiras quebras e quiçá sugerir metodologias de ancoragem apropriadas, assim como propor modificações nos grampos utilizados nos cabos das linhas de transmissão, visando minimizar o efeito dos danos ocasionado pela fadiga nas LT. A figura 4.16, apresenta todos os fios que foram mapeados e quebraram nos ensaios realizados. Teve caso, em que o fio só rompeu em apenas um ensaio, não repetindo o padrão como por exemplo os fios de topo externo, entretanto, todos foram mapeados. Estas regiões apresentadas, é considerada a área que ocorre maior aperto nos fios, quando o cabo é ancorado, haja vista, que há o aperto de 50N, além disso, houve a elevação da temperatura o que provocou mais falhas nos fios, principalmente na região externa do topo.

Para os ensaios realizados com temperatura de 75°C, o que se observou, é que o primeiro fio a se romper, na maioria dos ensaios foi na camada interna do CE, mas não se pode afirmar se elas ocorreram primeiro no topo ou na base do CE, mas há indícios de que, para menor amplitude, o fio rompa primeiro na base, enquanto para a maior amplitude, rompa na camada interna do topo primeiro. Entretanto, a sequência de quebras, para as três amplitudes na maioria dos ensaios foram muito parecidas. Está suposição pode ser observada na figura 4-17, que mostra as incidências das quebras dos fios para os ensaios da E1 realizados em temperatura de 75°C, separando as amplitudes, sendo três ensaios para cada amplitude.

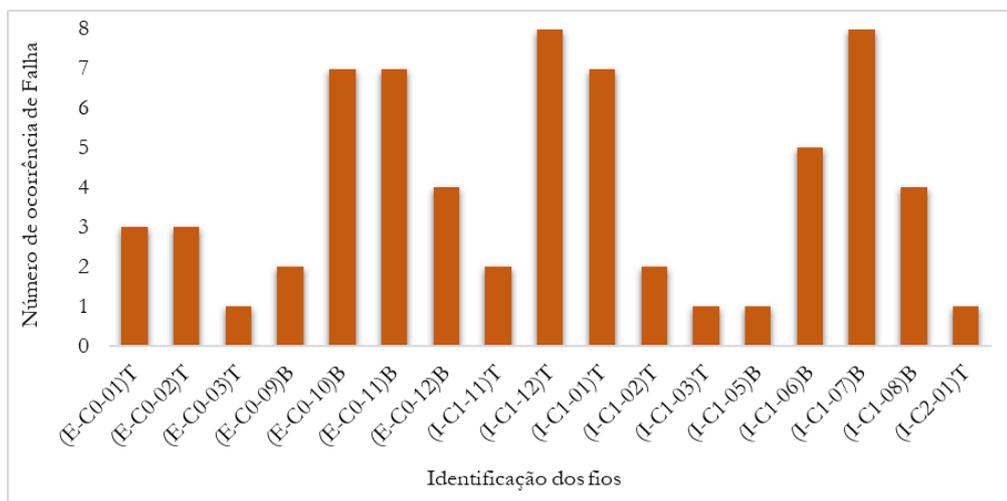


Figura 4-16 – Mapeamento dos fios que romperam nos 12 ensaios, 75°C

Nota-se que, para certas posições a numeração dos fios do CE, passa a assumir o número do fio vizinho, isso pode explicar a aleatoriedade de quebras para alguns fios. Uma possível explicação se dá, pelo fato de não ter sido possível manter sempre a posição da sequência de

numeração dos três fios de topo oposto ao UPC em todos os ensaios. Ao mudar o início da sequência, a numeração dos demais fios mudam, e isso ocorre de acordo com a posição em que o CE é colocado no grampo de ancoragem.

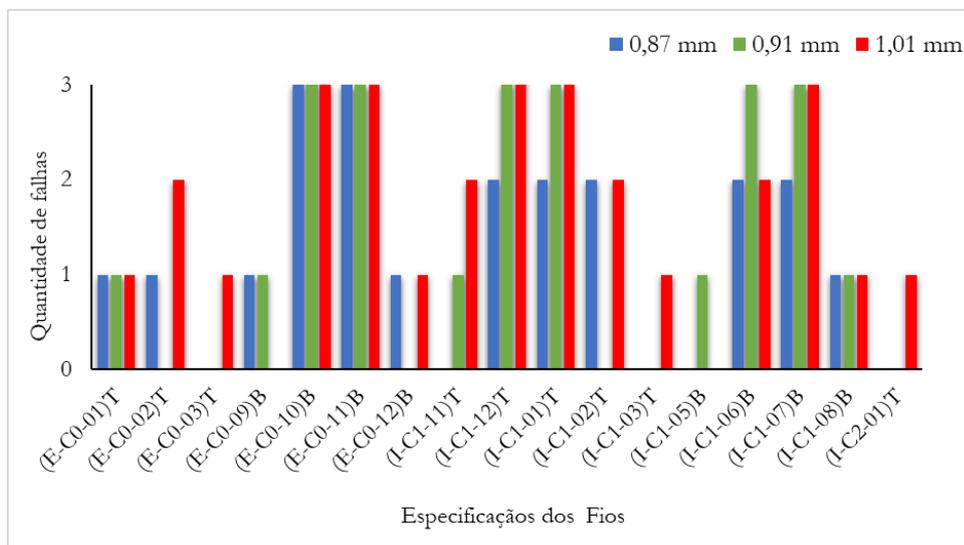


Figura 4-17 – Resumo das incidências de quebras dos fios, para o grupo E1 com temperatura de 75°C

Para os ensaios realizados na E2, os quais foram interrompidos, após a observação da primeira quebra, embora em alguns ensaios tiveram mais fios rompidos. Assim, foram realizados quatro ensaios em temperatura ambiente e três ensaios em 75°C, A figura 4.18 apresenta a semelhança das ocorrências das quebras para os mesmos fios, em ambas as temperaturas.

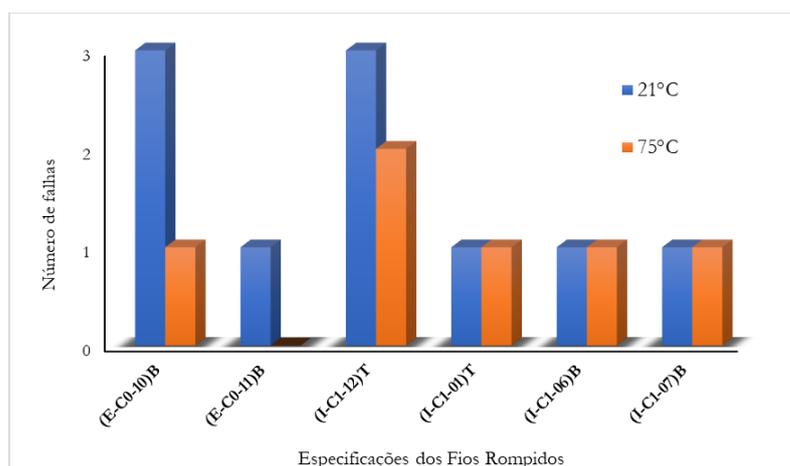


Figura 4-18 – Ocorrências de quebras dos fios, para o grupo E2

Ficou evidente neste estudo, que os primeiros fios a se romperem foram os da base externa na temperatura de 21°C e no topo interno em temperatura de 75°C e a segunda quebra ocorreram na base interna. Os fios que mais repetiram as quebras no grupo de quatorze ensaios (E1),

confirmaram também para o *E2*, observou se que não houve quebra externa no topo, em ambas as temperaturas, confirmando a ocorrência desta quebra, tardiamente.

4.3.3 Distância das Falhas em Relação a abertura do Grampo

Os ensaios apresentam um padrão de quebras entre si, assim, a distância da falha em relação a abertura do grampo foi medida, e para ambas as temperaturas de ensaios, a distância média das falhas (*DMF*) se mantiveram de forma regular. Sendo assim, foi realizado o mapeamento das ocorrências das falhas relacionadas à distância em relação a abertura do grampo de suspensão. É de interesse determinar a localização das falhas é determinar as distâncias entre os fios rompidos e a saída da abertura do grampo de suspensão conforme ilustra a figura 4.19 e as falhas são apresentadas no detalhe da foto aumentado.



Figura 4-19 – Marca da abertura do grampo, DMF, e falhas no detalhe aumentado

A distância da falha (*DF mm*), foram medidas de acordo com as marcas da abertura do grampo, conforme ilustra a figura 4.20. Após a abertura das amostras, as marcações da abertura do grampo foram preservadas através da colagem de fita com a descrição de cada fio rompido. Para medir os valores médio de cada DMF em relação a abertura do grampo, é tomada três medidas e calculada a média.

Os fios que falharam, a distância foi medida a partir da abertura do grampo, seguindo sempre os mesmos procedimentos. A posição da quebra e em qual camada do cabo, a falha ocorreu foram observadas e tabuladas e são apresentadas o resumo de todas as quebras no quadro do APÊNDICE E.



Figura 4-20 – Procedimentos de medir a distância média das falhas em relação a abertura do grampo.

A figura 4.21 apresenta os valores médio da distância medida das falhas em relação a abertura do grampo. Pode-se perceber que as distâncias se mantiveram dentro de um limite de distância padrão, para todas as amplitudes e temperaturas ensaiadas, e se manteve dentro dos tamanhos médios de 30mm e 44 mm.

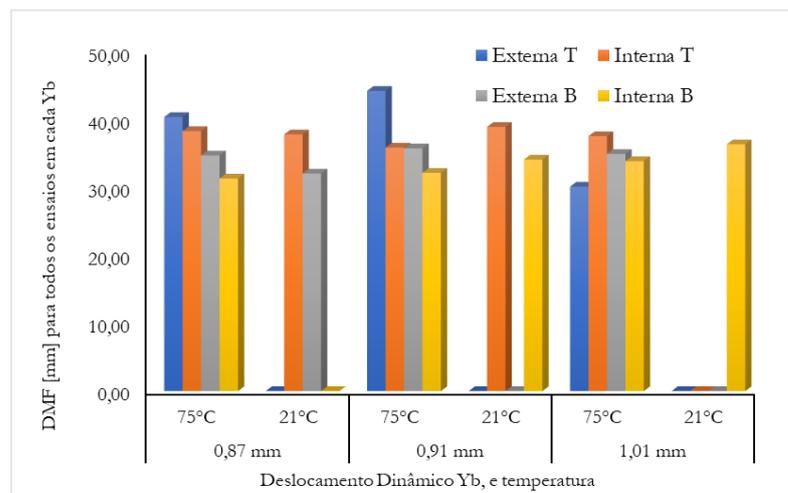


Figura 4-21 – Análise da distância média (DMF) das falhas nos fios para todos os ensaios, 75°C e 21°C

Foi realizado o comparativo quanto a incidência de ocorrências de quebras no topo e na base do CE, dito isto, a figura 4.22, apresenta este mapeamento das falhas nas camadas internas e externas, e se elas ocorreram na base ou no topo de cada amostra.

Foi observado que, à medida que a amplitude aumentava a DMF diminuiu razoavelmente, e as falhas de topo são mais longas, e manteve em uma DMF entre 30mm a 44, e as falhas que ocorreram na base, seja interna ou externa, se manteve em uma DMF entre 31 mm a 53 mm. Um mapeamento comparativo para as DMF dos fios foi realizado para ambas as temperaturas

(Ambiente para os dados da literatura e os ensaios realizados com a temperatura de 75°C da E1) este mapeamento foi descrito na seção 4.4.

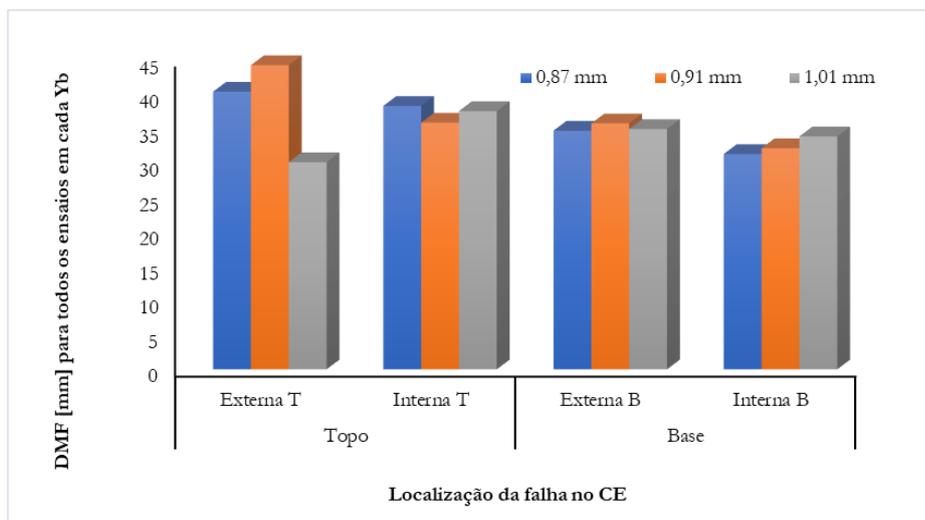


Figura 4-22 – Comparativo de ocorrências da DMF no topo e Base do CE, 75°C e 21°C

4.3.4 Mapeamento da Posição e da Ordem de Ocorrência das Falhas

Nesta seção, serão apresentados o mapeamento dos dois grupos de ensaios *E1* e *E2* realizados nesta pesquisa, onde serão apresentadas as análises comparativas. Para realizar o mapeamento das falhas, será considerado alguns aspectos tais como; i) o registro da sequência da quebra segundo a camada, sendo externa ou interna; ii) a posição de ocorrência da falha com referência à abertura (boca) do grampo de suspensão, e iii) a incidência de quebras que se repetem em uma determinada região na base e no topo.

A identificação da ordem das quebras foi realizada a partir da análise dos gráficos descrito nas seções do memorial de ensaio, assim o quadro 4.1 apresenta a distribuição das falhas de acordo com a camada de ocorrência, sendo E – falha na camada externa e I – falha na camada interna, sendo apresentada de acordo com a ocorrência de cada quebra, neste quadro aparece o resumo de todos os ensaios realizados nesta tese e que houve falhas.

Como a quantidade de quebras para finalização do ensaio para a etapa *E2*, foi de apenas uma quebra, algumas análises foram realizadas separadamente, desta forma, entretanto em algumas análises as estatísticas serão apresentadas juntos e em outros em separados para um melhor entendimento dos resultados, a única distinção foi entre as etapas, pois a E1 contém dados da literatura e na E2 somente dados dos ensaios realizados nesta pesquisa. Dito isto, a figura 4.23

apresenta as incidências das falhas por camada para todos os ensaios, nas duas temperaturas de ensaio 75°C e 21°C.

Quadro 4-1 – Ordem das Falhas por Camada.

Y_B [mm]	ENSAIOS	CAMADA DE OCORRÊNCIA DA FALHA											
		01ª quebra	02ª quebra	03ª quebra	04ª quebra	05ª quebra	06ª quebra	07ª quebra	08ª quebra	09ª quebra	10ª quebra	11ª quebra	12ª quebra
0,87	EN-10_A1 1/3 75°C	I	I	E	E	I	I	E	E				
	EN-02_A1 2/3 75°C	I	I	E	E								
	EN-09_A1 3/3 75°C	I	E	E	E	I	I	E					
	EN-16_A1 1/3 75°C	I	I										
	EN-12_A1 3/3 Amb	I	E	E									
	EN-13_A1 1/3 Amb	E											
0,91	EN-07_A2 1/3 75°C	I	I	I	E	E	I	I	E				
	EN-11_A2 2/3 75°C	I	E	E	I	I	I						
	EN-03_A2 3/3 75°C	E	I	I	I	E	E	I	I	I	E		
	EN-18_A2 3/3 75°C	E											
	EN-14_A2 2/3 Amb	I	I	I	I								
1,01	EN-04_A3 1/3 75°C	I	I	I	E	E	E	I	I	I	I	E	E
	EN-08_A3 2/3 75°C	I	I	I	E	I	E	I					
	EN-06_A3 3/3 75°C	I	I	E	I	I	I	E	E	I			
	EN-05_A3 2/3 75°C	I	I	I									
	EN-15_A3 3/3 Amb	E											

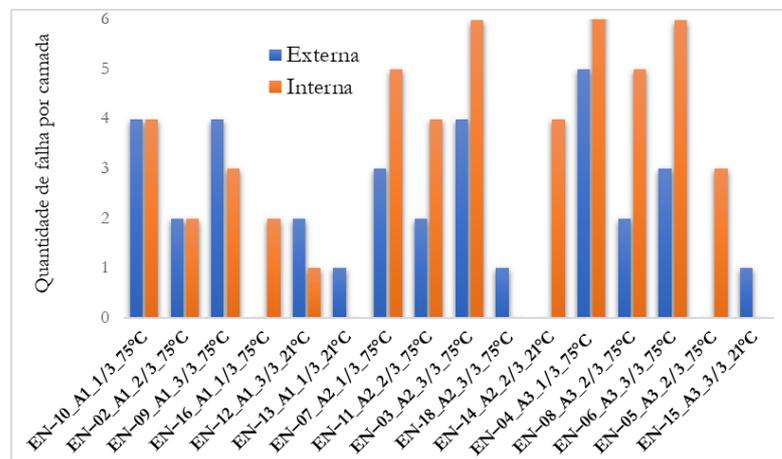


Figura 4-23 – Incidência de falha por Camada para todos os ensaios, 75°C e 21°C.

Neste sentido, a figura 4.24, permite avaliar a distribuição das quebras por camada do CE dos ensaios realizados com temperatura de 75°C, sendo que é evidente a ocorrência de maiores quantidades das quebras internas para as três amplitudes ensaiadas de 53 %, 60% e 68% para o Y_b de 0,87 mm, 0,91 mm e 1,01 mm, respectivamente.

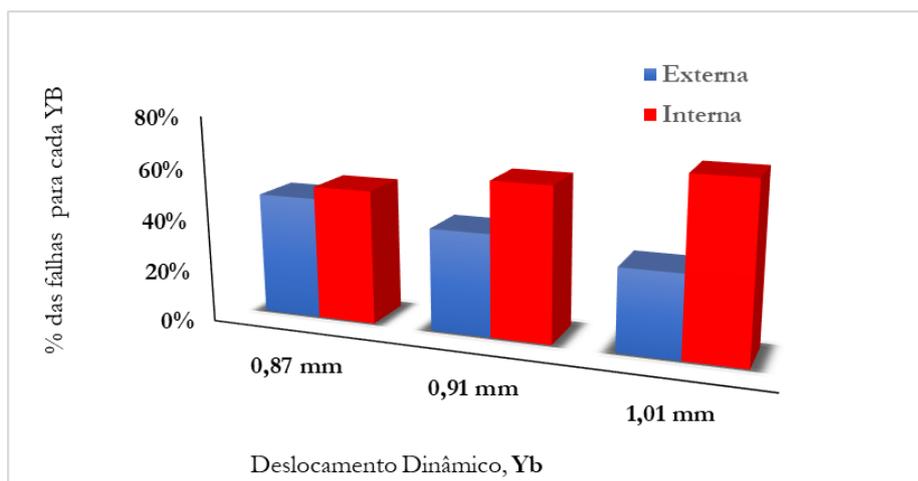


Figura 4-24 – Percentuais da incidência das falhas externas e internas, 75°C

Conforme supracitado, ficou evidente o aumento das quebras dos fios, conforme o aumento da amplitude de ensaio, isto é evidenciado na figura 4.25, a contabilização das 77 quebras nos doze ensaios realizados com temperatura de 75°C, sendo 30 das falhas externas, o que representa 39% das quebras, e representando 61% para as quebras internas, sendo 47 quebras. Evidenciando a ocorrência da maioria das quebras no interior da amostra do CE. Outra observação importante, sobre os percentuais apresentados, de todas as falhas ocorridas nas camadas externa e internas para todas as amostras ensaiadas.

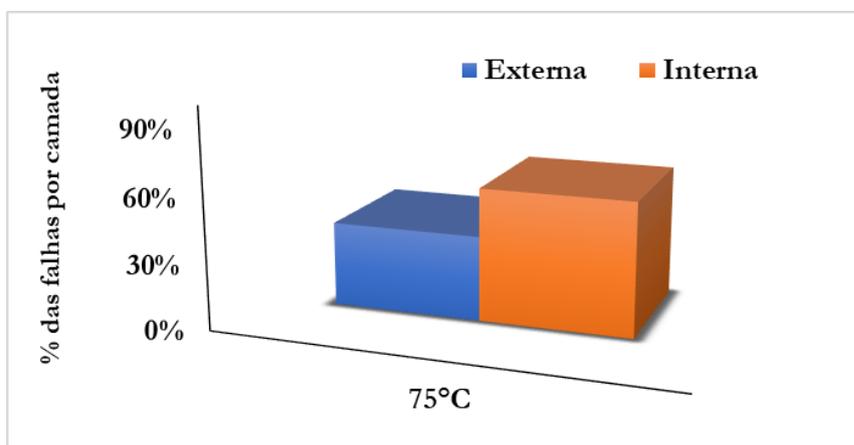


Figura 4-25 – Percentual do total das falhas externas e internas, para os ensaios da E1, 75°C

As figuras 4.26 e 4.27 confirmam as ocorrências de um maior percentual para as quebras internas também nas amostras da E2 de 75°C, enquanto o percentual em temperatura de 21°C são menores, mas a evidência das quebras ocorrerem em maior percentual na camada interna é confirmada nas análises dos ensaios da E2. Pode-se perceber que o comportamento

para ambos os casos são parecidos, corroborando com os resultados observadas nos ensaios da *E1*.

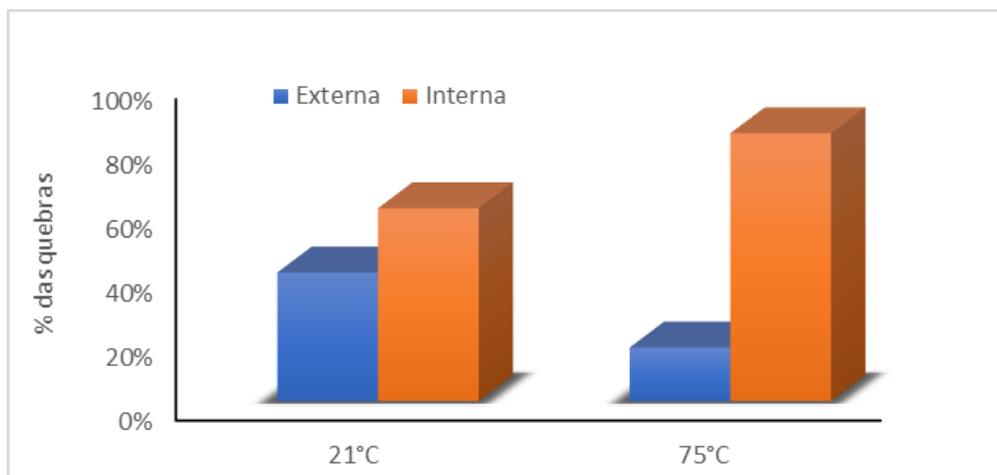


Figura 4-26 – Porcentagem das falhas por camada, para a análise da *E2*

O que se observou na *E2*, que há uma tendência de as quebras ocorrerem primeiro nos fios internos, sejam de topo ou base, seguindo os fios externos de base e por último nos fios de topo externos. Em alguns ensaios aconteceu a primeira quebra no fio de base que estão apoiados no grampo de ancoragem, esse comportamento foi observado em maior proporção nos ensaios em temperatura ambiente de 21°C.

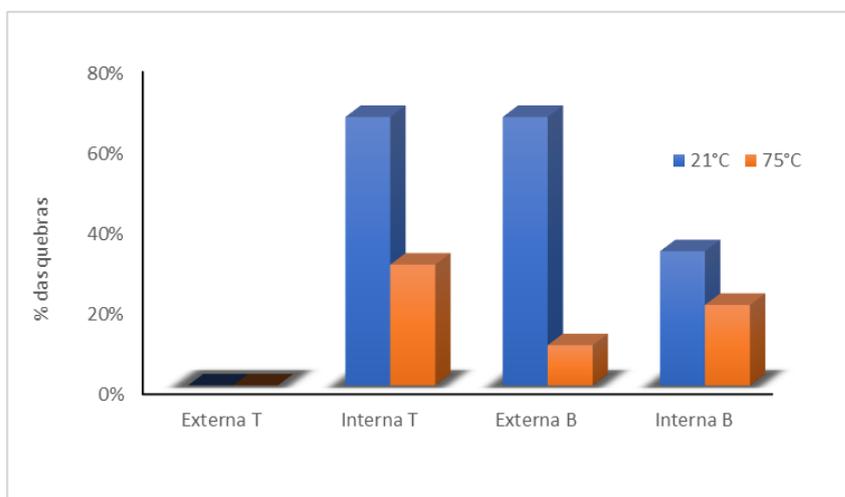


Figura 4-27 – Distribuição de falhas por camada, para o grupo *E2*

4.3.5 Avaliação das Superfícies de Falha

Os padrões de falhas nos fios rompidos ocorrem de diversas maneiras e, geralmente, estabelecem um padrão morfológico que se repetem na maioria dos ensaios. Nesta seção far-se-

á uma avaliação dos padrões observados e na morfologia da superfície da falha e da zona de falha quanto ao formato (análise macroscópica). Também pretende mostrar a quantidade de óxido de alumínio (Al_2O_3) nas amostras após o ensaio, de modo a avaliar a possível influência da temperatura na formação deste óxido.

Como mencionado anteriormente, o mecanismo de falhas em cabos aéreos de energia elétrica quando submetidos a carregamento dinâmico com certas amplitudes é um problema que ocorrem no interior do grampo de suspensão, Fadel (2010) relata a formação de óxido de alumínio produzido durante o ensaio em EDS de 30% e amplitude de $0,87mm$, nos ensaios de fadiga realizado em temperatura ambiente, a foto da figura 4.28, apresenta um ensaio o qual apresenta a formação do óxido, só que em pequenas quantidades. Neste sentido, foi observado que, em todos os ensaios realizados com temperatura de $75^\circ C$, foi observado uma grande quantidade de óxido.



Figura 4-28 Pó de Al_2O_3 na vizinhança da boca do grampo de suspensão após retirada da amostra (FADEL et al., 2012)

A formação de óxido se acumulava durante o ensaio e após a retirada da amostra, era possível constatar uma grande quantidade dele. Durante os ensaios foi observado que em menos de um milhão de ciclos já era possível visualizar a formação de Al_2O_3 na vizinhança da abertura do grampo de suspensão e no CE. As fotos da figura 4.29 (e no detalhe ampliado embaixo da foto da figura 4.29) é possível ver que após a retirada da amostra, a grande quantidade de óxido pode ser evidenciada após a amostra ser desmontada, o acúmulo é mostrado no detalhe ampliado no topo da foto da figura 4.29.

A foto da figura 4.30 apresenta o interior da amostra do EN-09_A1_3/3_75° e a quantidade excessiva de óxido formado, e no detalhe ampliado. Este ensaio foi realizado com a amplitude de $0,87mm$ e EDS de 31%, a única variável a mais inserida foi a temperatura de $75^\circ C$. Embora,

não tenha sido objeto desta tese a análise sobre o fenômeno de *fretting*, algumas observações sugere o efeito da temperatura na ampliação deste fenômeno, bem como a formação de oxido em grandes quantidades, observada nos ensaios. A ocorrência da quebra da camada 02 interna (C02) é apresentada na foto da figura 4.31 apresenta a quantidade excessiva de oxido Al na abertura e retiradas dos fios da amostra do EN-08-A3-2/3-75°C e no detalhe aumentado a quebra na C-02.



Figura 4-29 – Pó de Al₂O₃ no grampo de suspensão durante e após retirada da amostra



Figura 4-30 – Quantidade excessiva de oxido na amostra EN-09_A1_3/3_75°C



Figura 4-31 – Quantidade excessiva de oxido retirada da EN-08_A3_2/3_75°C e detalhe da quebra na C02

4.3.5.1 Avaliação Macroscópica das Superfícies de Falha

Conforme discutido na seção 4.3 as quebras dos fios do CE submetido a carregamento dinâmico ocorreram em maior porcentagem na camada interna para ambas as temperaturas de ensaio, ao todo foram seis tipos de morfologia de superfícies de fratura que foram identificadas após os testes de fadiga em temperatura de 75°C. Entretanto, a classificação predominante se manteve conforme foi estabelecido por Badibanga (2017).

A classificação da morfologia das quebras nem sempre é tarefa fácil, pode ser observado que no mesmo fio, a quebra pode aparecer em mais de um padrão predominante em ambos os lados do fio rompido, aparecendo variações das classificações já pré-determinada. Foi observado quebras que formam quase a semelhança com a letra “L” maiúscula, entretanto apresentam formas irregulares com predominância, ou seja, quase forma a letra L, e aqui foram classificadas como L. Outro ponto, em alguns casos algumas quebras apresentaram semelhança com a letra “V” maiúscula, entretanto com irregularidades sendo classificado com V. Sendo assim, procurou manter a morfologia e a forma de classificações já estabelecidas como foram observadas nos ensaios em temperatura ambiente.

Com este propósito, as falhas foram mapeadas conforme segue, a figura 4.32 apresenta as seis variações destas morfologias: 1) Falha que apresentou aspecto superfície da falha quase plana (QP) (figura 4.32 a) ; 2) a falha é predominantemente inclinada em um ângulo de 45° (figura 4.32 b)); 3) as quebras formam uma semelhança com a letra “L” maiúscula (figura 4.32 c)); 4) as quebras formam uma semelhança com a letra “V” maiúscula (figura 4.32 d)); Os

diferentes tipos foram classificados de acordo com o valor do deslocamento de flexão (Yb) aplicado a 89 mm do UPC entre o condutor e o grampo de suspensão durante o experimento. No APÊNDICE F é apresentado o resumo de todos os ensaios, bem como o tipo de quebra que ocorreu em cada ensaio, e a DMF.

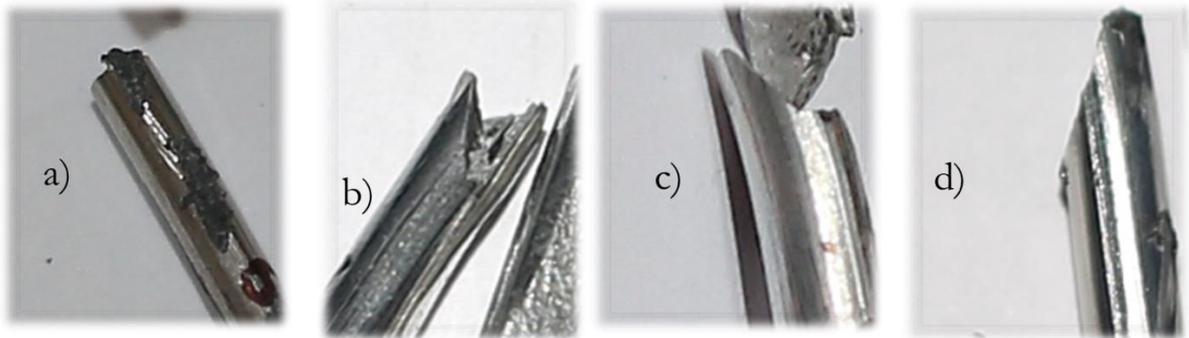


Figura 4-32 – Falha quase plana (QP a)), inclinada em 45° b), semelhança com a letra “L” c), semelhança com a letra “V” d).

Diante das observações realizadas, parece que o tipo de fratura da superfície não depende dos parâmetros de ensaio, como amplitude e temperatura, pois a probabilidade de ter um tipo de quebra de superfície variava de um ensaio para o outro. As figuras 4.33 e 4.34 apresenta as morfologias observadas, nos ensaios EN-10 e EN-04 respectivamente, esses ensaios apresentam comportamento semelhante, uma vez que a probabilidade de ocorrência do tipo de fratura parece não depender dos parâmetros de ensaio. Entretanto, pode-se observar que o tipo de superfície de fratura QP e 45 ° é o tipo mais comuns encontradas nos fios rompidos.



Figura 4-33 – Frequências das morfologias das falhas EN-10_A1_1/3_75°C

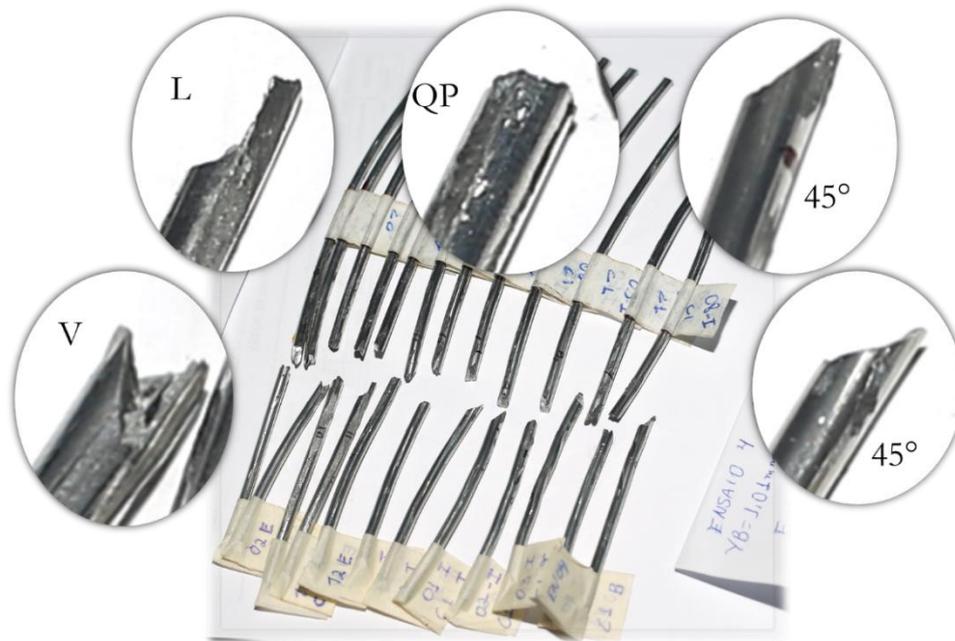


Figura 4-34 – Frequências das morfologias das falhas do EN-03_A2_3/3_75°C

A comparação dos tipos de superfícies de fratura nos fios rompidos dos ensaios em termos da amplitude é apresentada na figura 4.35 apresenta a estatística da quantidade das falhas e na figura 4.36 apresenta a porcentagem. A comparação foi estabelecida entre as camadas interna e externa e a predominância quanto ao topo e base, para diferentes valores de amplitude (0,87 mm, 0,91 mm e 1,01 mm) nos ensaios realizados em temperatura de 75°C.

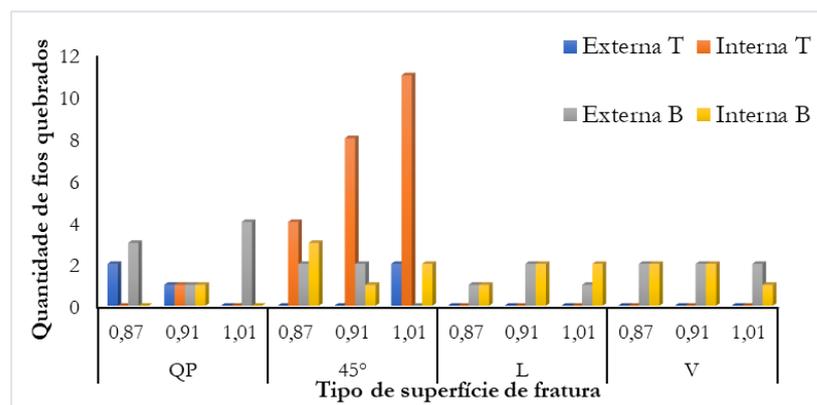


Figura 4-35 – Probabilidade do tipo de falha em todos os ensaios realizados em 75°C.

Observações determinaram que o comportamento da ocorrência é semelhante, a partir dessas comparações, relacionada a amplitude, o tipo 45° apresenta as maiores probabilidades para as três amplitudes testadas, entretanto à medida que a amplitude cresceu, aumentou-se também a quantidade de fios com esta características. Vale ressaltar que, apesar de ter quebras do tipo QP

e 45° tanto na base como no topo, as quebras no topo externo são predominantes de dois tipos, enquanto para as quebras no topo interno apresentou maior quantidade para o tipo 45°. O tipo L e V aparecem em menores quantidades, e não houve quebras deste tipo no topo, somente na base do CE.

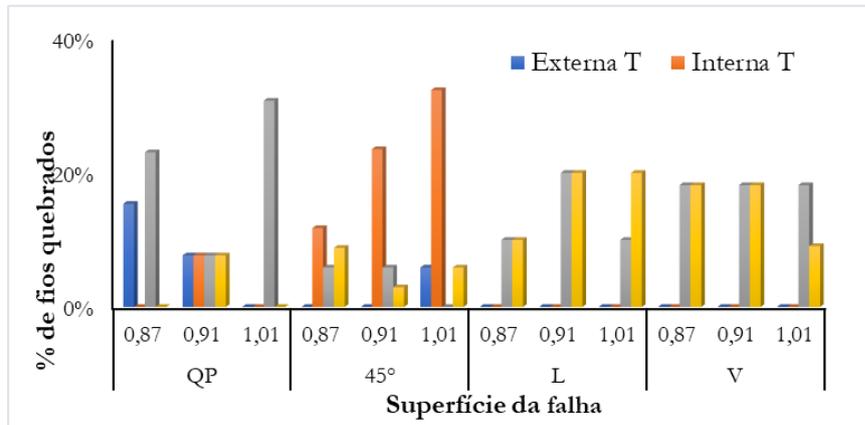


Figura 4-36 – porcentagem do tipo de falha em todos os ensaios realizados em 75°C.

Pode-se perceber que as quebras apresentaram comportamentos parecidos, entretanto para as amplitudes de 0,87 mm e 1,01 mm, divergiu em relação as camadas, apresentando quebras do tipo QP ocorreram apenas na camada externa, enquanto, para os outros tipos de falhas ocorreram em ambas as camadas, e apresentou maior quantidade para as quebras do tipo L e V para as todas as amplitudes ensaiadas. A figura 4.7 apresenta a porcentagem do tipo da superfície de falha e a ocorrência delas nas camadas. Observa-se que o tipo quase plano ocorreu somente na camada externa para as amplitudes de 0,87 mm e 1,01 mm, enquanto para as demais houve uma variação ocorrendo para ambos as amplitudes.

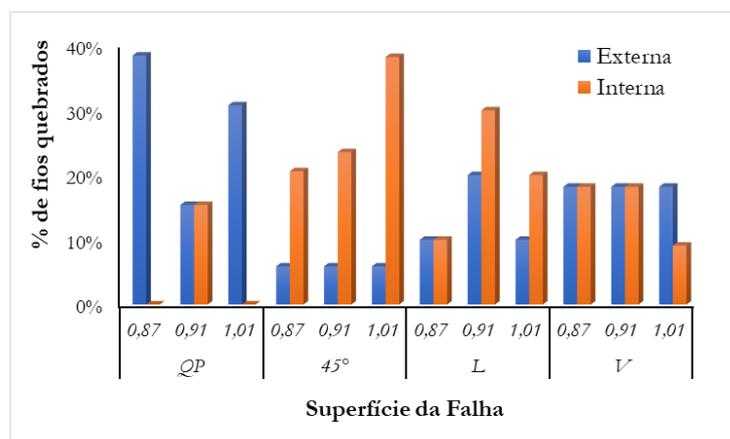


Figura 4-37 – Superfície da Falha para as amplitudes de ensaio, em 75°C.

4.4 MAPEAMENTO DAS FALHAS E COMPARAÇÃO ENTRE ENSAIOS DA E1

A fim de elucidar provável influência da temperatura nos ensaios de fadiga, foi realizada uma inspeção visual em algumas amostras ensaiadas em temperatura ambiente, dos dados já publicados, das quais. Em virtude de ter sido recuperado apenas sete, dos nove ensaios, do cabo Orchid realizado por (Badibanga, 2017) em temperatura ambiente. Foi adotado o comparativo entre sete ensaios, onde foram mapeados a frequência de quebra dos fios, a quantidade de falhas, a distância da falha, a camada e a posição das falhas, o APÊNDICE F apresenta o resumo de todos os ensaios para esta análise.

Assim sendo, os ensaios analisados realizados em temperatura ambiente, foram dois com amplitude de $0,87\text{ mm}$, aqui chamado de ensaios 01_A1_1/3_Amb e 03_A1_3/3_Amb. Os ensaios com amplitude de $0,91\text{ mm}$, foram os três pontos, nomeados de ensaios; 01_A2_1/3_Amb, 02_A2_2/3_Amb e 03_A2_3/3_Amb. Já para a amplitude de $1,01\text{ mm}$ foram recuperados dois ensaios os; 01_A3_1/3_Amb e 03_A3_3/3_Amb. Devido a isto, a fim de fazer uma análise comparativa com a quantidade de amostras relacionadas as condições de temperaturas dos ensaios realizados, foram escolhidos os ensaios correspondentes em temperatura de 75°C . Disto isto, os ensaios em temperatura de 75°C com amplitude de 87 mm foram: EN-10_A1_1/3_75°C e EN-09_A1_3/3_75°C, para a amplitude de $0,91\text{ mm}$ EN-07_A2_1/3_75°C, EN-11_A2_2/3_75°C e EN-03_A2_3/3_75°C, e para a amplitude de $1,01\text{ mm}$, selecionou se os ensaios EN-04_A3_1/3_75°C e EN-06_A3_3/3_75°C. A partir das anotações dos ensaios, foi possível resgatar a quantidade total de ciclo de cada ensaio em temperatura ambiente. A tabela 4.6 apresenta o ensaio em temperatura ambiente e o equivalente realizado em temperatura de 75°C , e a sumarização da quantidade total de ciclos correspondente que cada ensaio foi finalizado.

Tabela 4-6 – Quantidade de ciclos dos ensaios nas duas temperaturas

Identificação do ensaio	Identificação do ensaio	Quantidade de ciclos dos ensaios	
		N_{Amb}	$N_{75^{\circ}\text{C}}$
01_A1_1/3_Amb	EN-10_A1_1/3_75°C	2,72E+06	3,18E+06
03_A1_3/3_Amb	EN-09_A1_3/3_75°C	2,43E+06	2,74E+06
01_A2_1/3_Amb	EN-07_A2_1/3_75°C	3,00E+06	2,79E+06
02_A2_2/3_Amb	EN-11_A2_2/3_75°C	2,80E+06	2,79E+06
03_A2_3/3_Amb	EN-03_A2_3/3_75°C	2,57E+06	3,05E+06
01_A3_1/3_Amb	EN-04_A3_1/3_75°C	2,45E+06	1,77E+06
02_A3_3/3_Amb	EN-06_A3_3/3_75°C	2,51E+06	1,54E+06

Estas estatísticas são importantes para fazer o comparativo com a quantidade de falhas ocorridas em cada ensaio, ficou evidente o aumento significativo da quantidade de fios rompidos, quando o ensaio foi realizado em temperatura de 75°C , é possível que o aumento da temperatura possa ter contribuído com esse fenômeno, entretanto, a tensão média é outro fator determinante que potencializa o aumento das quebras, principalmente quando o ensaio é realizado em temperatura de 75°C .

Desta forma, foram separados os ensaios aos quais correspondiam às ordens de ocorrência para compor cada ponto das estatísticas, fazendo o comparativo com os ensaios que foram submetidos a temperatura de 75°C . Isto foi feito a fim de garantir a comparação das duas condições de temperatura em um conjunto amostral maior. Na figura 4.38, é possível perceber que excetuando os ensaios com amplitude de $1,01\text{ mm}$, que teve uma estatística de quantidade menor de ciclos para a quantidade de ciclos para o grupo de ensaio, os demais foram finalizados com a média de ciclos parecidas.

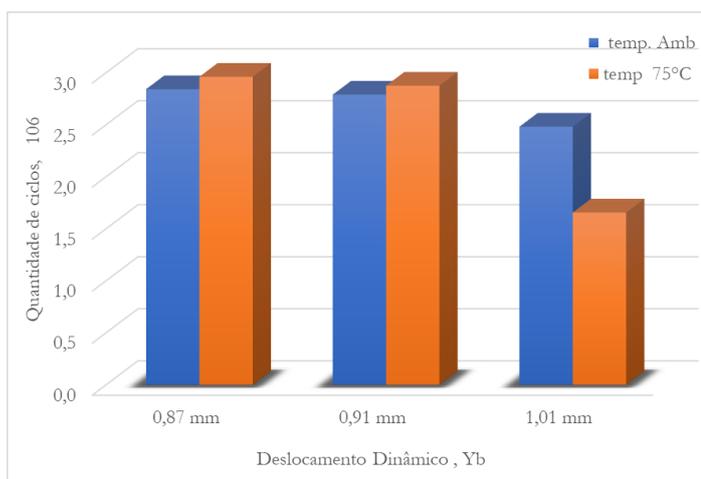


Figura 4-38 – Média da quantidade médias dos ciclos

A ordem de uso para o mesmo CE, para produzir as amostras, também foi preservada, assim, para cada amostra ensaiada em temperatura ambiente, selecionou se a amostra do ensaio correspondente em temperatura de 75°C . Este procedimento se deu para verificar a repetibilidade das ocorrências das falhas nos mesmos fios em ambas as amostras analisadas. Assim, foram realizadas as inspeções visuais das distribuições das falhas de acordo com a camada de ocorrência, sendo E, para a falha na camada externa e I, para a falha na camada interna. Desta forma, as análises foram realizadas em uma população quantitativamente igual, apesar de não ser objeto desta comparação a ordem das ocorrências das quebras e a quantidade

de ciclos correspondente em que ocorreu cada quebra. Entretanto, foi possível verificar os padrões das falhas, identificando as quebras dos fios e sua posição.

Com este propósito, só foram adicionados ao grupo de amostras, os ensaios a quais puderam ser realizadas as inspeções visuais, sendo possível realizar novas medidas da DMF e verificar quais fios se romperam e a quantidade de quebras em cada ensaio.

De uma forma genérica será mostrado a quantidade de quebras nos fios rompidos para cada ensaio nas duas condições ensaiadas, e apresentada a quantidade das falhas de acordo com a camada de ocorrência. Foi realizado um mapeamento para verificar se a temperatura influenciou nas ocorrências das quebras quanta a camada. Na figura 4-39 apresenta todas as quebras ocorridas nos ensaios analisados.

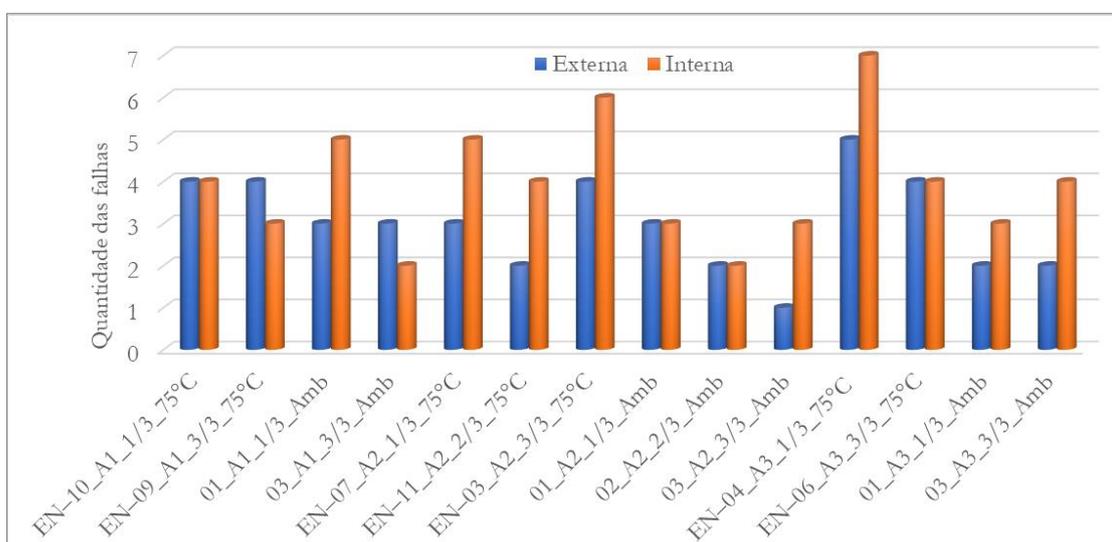


Figura 4-39 – Quantidade de falhas nas camadas em cada ensaio, temperaturas Amb e 75°C.

Neste conjunto de amostra, de quatorze ensaios, foram contabilizadas 97 quebras, sendo 42 falhas externas o que representa 43,3% das falhas e 55 falhas internas, o que representou maior percentual de 56,7%. Considerando a porcentagem para a ocorrência de quebras internas e externas, para as duas temperaturas ensaiadas, a figura 4.40 apresenta os percentuais das falhas externas e internas para os quatorze ensaios analisados. Sendo que, para os ensaios realizados em temperatura de 75°C, teve uma porcentagem de 44% e 56% para as falhas externas e internas respectivamente. Enquanto, que para os ensaios realizados em temperatura ambiente apresentou taxas para as falhas externas de 42%, e para as falhas internas de 58%. Pode-se perceber que a porcentagem das falhas internas apresentou maior porcentagem em ambos os casos. Foram contabilizadas 38 quebras para os ensaios executados em temperatura ambiente e

um total de 59 quebras nos ensaios com temperatura de 75°C. Embora, a quantidade de quebras seja evidentemente superior em relação aos ensaios executados em temperatura ambiente. A tendência das ocorrências das quebras internas foi semelhante em ambas as temperaturas de ensaio.

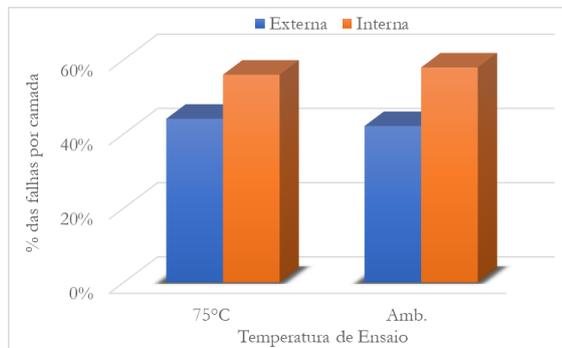


Figura 4-40 – Percentuais das falhas externas e internas, temperaturas Amb e 75°C.

Sendo assim, foi verificada a influência da tensão média e são apresentados os percentuais de todas as falhas ocorridas nas camadas externas e internas para cada amplitude ensaiada, considerando as duas temperaturas ensaiadas, a figura 4.41 confirma as ocorrências de quebras internas em quase todas as amplitudes, exceto para a amplitude de 0,87mm que apresentou um percentual oposto aos demais, apresentando 53% das quebras externas e 47% para as quebras internas, enquanto em temperatura ambiente manteve a tendência de maior quantidade de quebras internas. Nos níveis das amplitudes de 0,91 mm e 1,01 mm os percentuais de falhas internas foram predominantes e igualitários nas duas situações de ensaios.

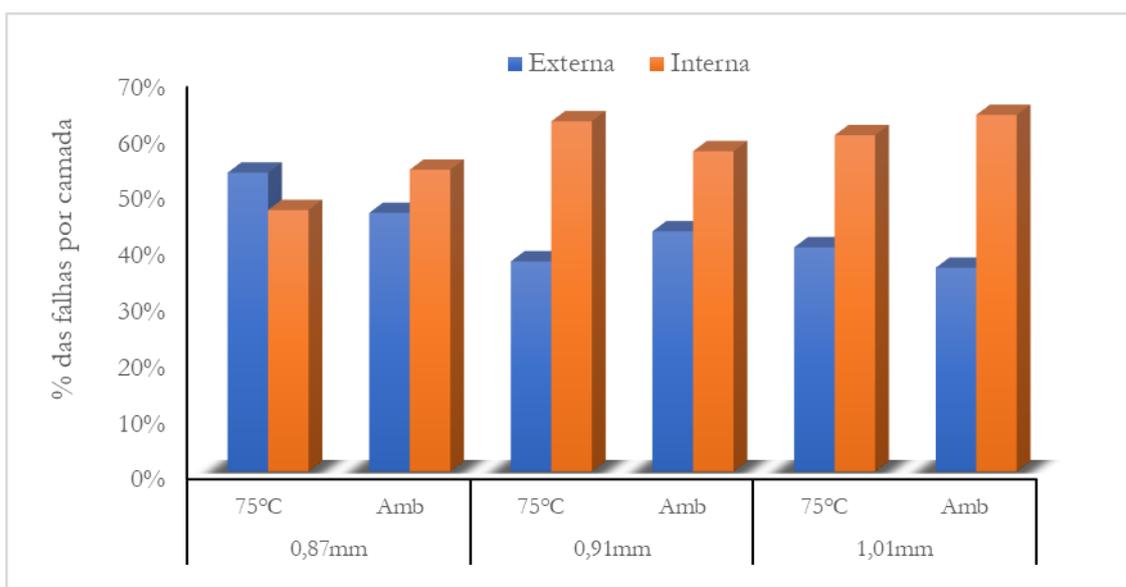


Figura 4-41 – Distribuição das falhas por camada para cada amplitude, nas temperaturas Amb e 75°C

Embora seja uma pequena diferença apresentada nos ensaios submetidos a temperatura de 75°C é possível perceber o aumento significativo de 23,91% de ocorrências das falhas nos ensaios realizados em 75°C. Foram verificadas as ocorrências das falhas, separando em amplitudes e posição, é ilustrado na figura 4.42 a quantidade de quebras ocorrências de quebras de T e B, pode se perceber que há maior ocorrências das quebras externas na base em temperatura ambiente na amplitude de 89 mm, e não houve quebra externa de topo nesta condição de ensaio nas três amplitudes de ensaio, a porcentagem de ocorrências é ilustrada na figura 4.43.

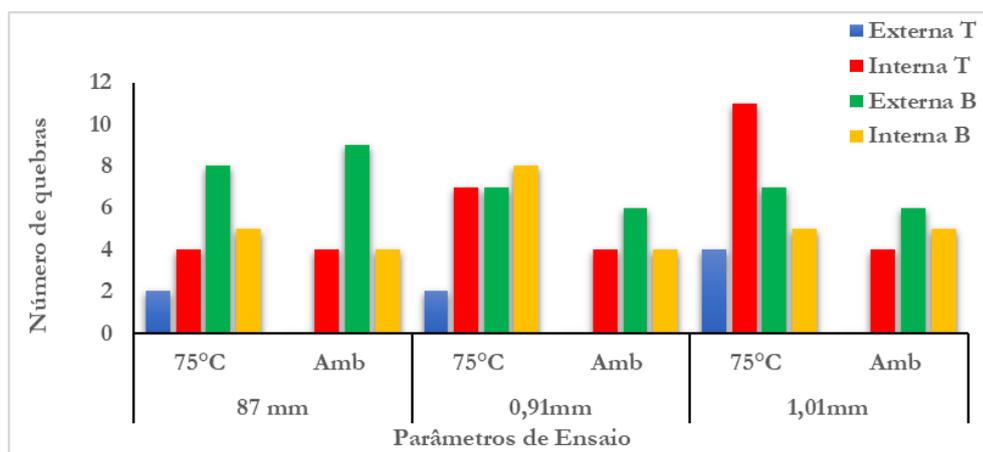


Figura 4-42 – Ocorrências de quebras T e B, temperaturas Amb e 75°C.

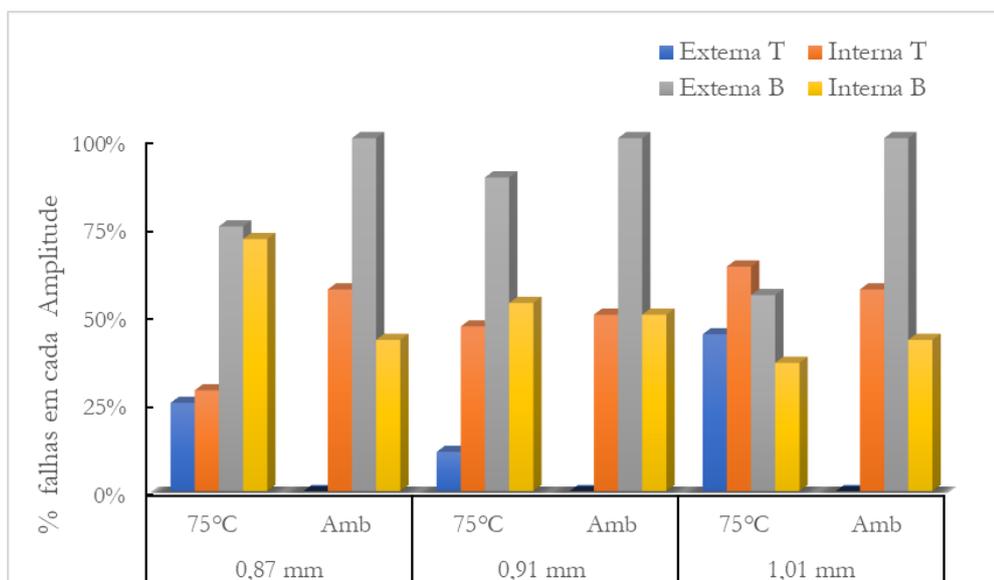


Figura 4-43 – % ocorrências de quebras T e B, temperaturas Amb e 75°C.

Entretanto, ao observar a posição das quebras em relação à camada, foi verificado se a falha havia ocorrido na camada externa ou interna, ficou evidente que em todas as amplitudes

ensaiadas em temperatura ambiente, não houve falhas no topo da amostra na camada externa nos ensaios inspecionados. Esta pesquisa mostrou que a tendência de as quebras ocorrerem na base e com alguns ciclos de diferença foi frequente, e casos de quebras simultâneas. A figura 4.44 apresenta a foto da amostra do ensaio 9, em que os quatro fios que são apoiados no grampo de suspensão se romperam e as falhas ocorreram quase que simultânea, conforme descrito no memorial de ensaio.

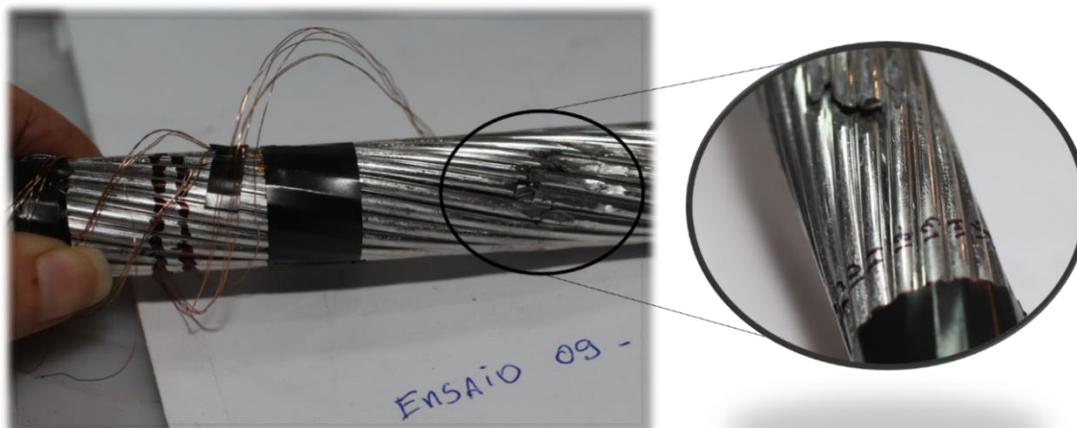


Figura 4-44 – A figura 6-43 mostra o ensaio 9, que todos os fios se romperam durante o ensaio.

Na figura 4.45 confirma um maior percentual das falhas na camada externa, nos fios da base da amostra, para ambas as temperaturas ensaiadas, isto é, as falhas tendem a se iniciar na base do CE, entretanto, isto foi mais evidente nos ensaios de maior amplitude, em amplitudes menores a tendência é dar início no topo interno. Este comportamento foi observado também nos ensaios em temperatura de 75°C, haja vista, que ocorreram algumas quebras nos fios de topo da camada externa para esta temperatura.

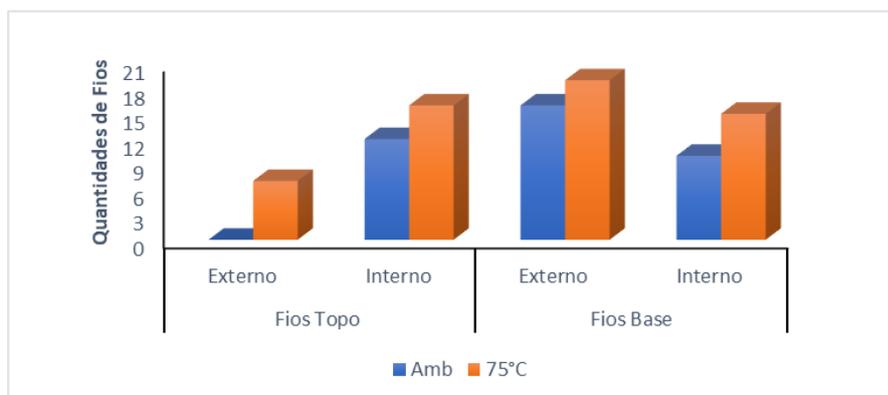


Figura 4-45 – Ocorrências de quebras nos fios de T e B, temperaturas Amb e 75°C

Uma observação importante é que para esta análise a amplitude de 0,91 mm foi representado por três ensaios em cada temperatura, o que representou um grupo maior de falhas para esta

amplitude. Entretanto, o mesmo comportamento foi identificado no conjunto menor de amostra dos ensaios da *E2*, onde foi analisado um ensaio para cada temperatura.

4.4.1 Posicionamento das Falhas em Relação ao Grampo

A seguir será realizada a mesma análise da posição da falha em relação à abertura do grampo de suspensão, conforme foi discutido na seção. 4.3.3. A figura 4.46 apresenta a distância média das quebras em relação à abertura do grampo em relação a base e topo. Pode perceber que as distâncias se mantiveram dentro de um limite de distância média tanto na camada interna e externa em todas as amplitudes e temperaturas ensaiadas (figura 4.47), e se manteve dentro dos 30,01 mm a 45,18 mm, apresentando valores semelhantes relatados na seção 4.3.3 dos ensaios realizados para a composição deste trabalho, estes valores já eram esperados, haja vista, que muitos destes ensaios estão na composição da estatística geral.

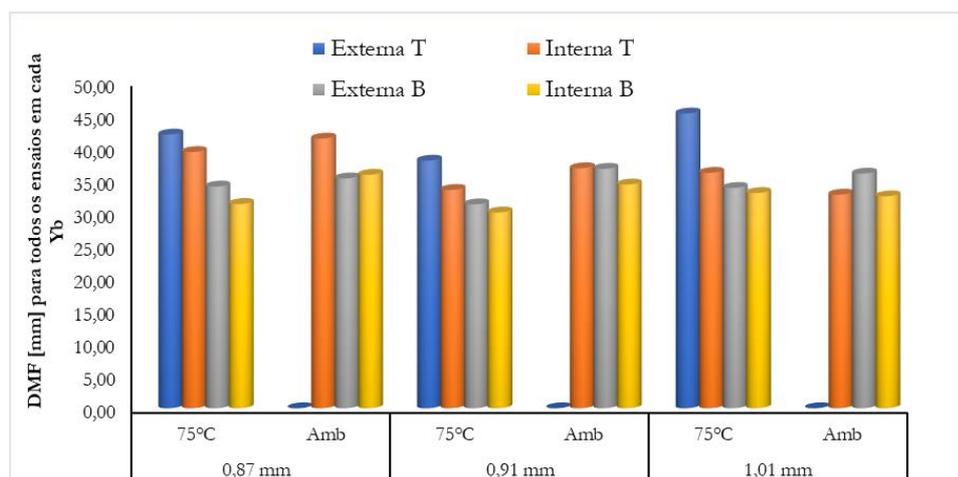


Figura 4-46 – Análise da distância média (D_{FM}) das falhas nos fios nas temperaturas Amb e 75°C

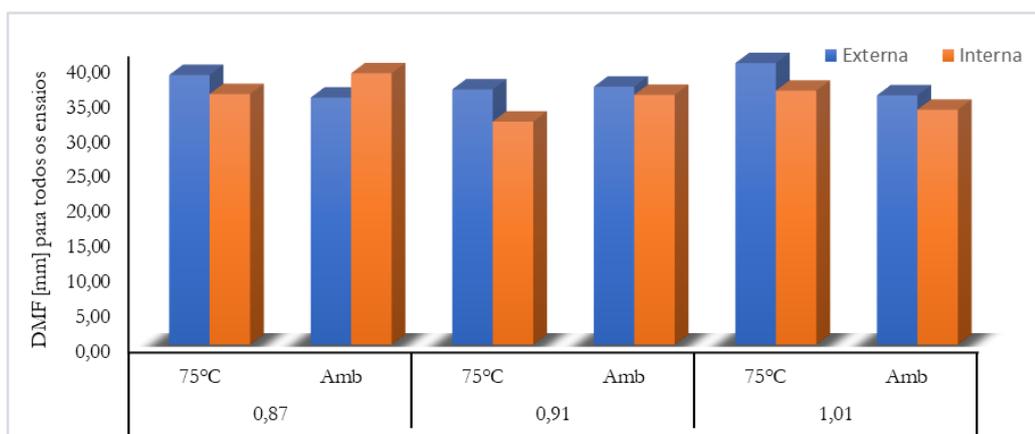


Figura 4-47 – Distribuição das Quebras por Camada nas temperaturas Amb e 75°C

4.4.2 Mapeamento do Padrão de ocorrências das quebras nos fios

Foi repetida aqui a mesma análise realizada na seção 4.3.2 assim, as nomenclaturas estabelecidas foram mantidas, e o procedimento foi repetido para o conjunto de 14 amostras separadas para o comparativo. Para esta análise foi realizado o mapeamento para estabelecer padrão de ocorrência de quebras nos fios. Isto foi feito a fim de verificar se os mesmos fios rompidos nos ensaios em temperatura de 75°C, se repetiam para os ensaios em temperatura ambiente. Assim foi possível verificar os padrões de quebras dos fios, em ambas as temperaturas em uma população amostral maior. A figura 4.48, apresenta todos os fios que romperam para este conjunto de ensaios, foi realizado o mesmo comparativo entre os fios que quebraram em ambos os ensaios, e teve a repetições em vários ensaios nas duas condições ensaiadas. Pode-se perceber que não houve quebra dos fios de topo externo, para os ensaios realizados em temperatura ambiente. Uma provável explicação é o fato de que estes fios foram um dos últimos fios a se romperem nos ensaios em temperatura de 75°C, e foi observada após a quarta e quinta quebra, conforme memorial de ensaio.

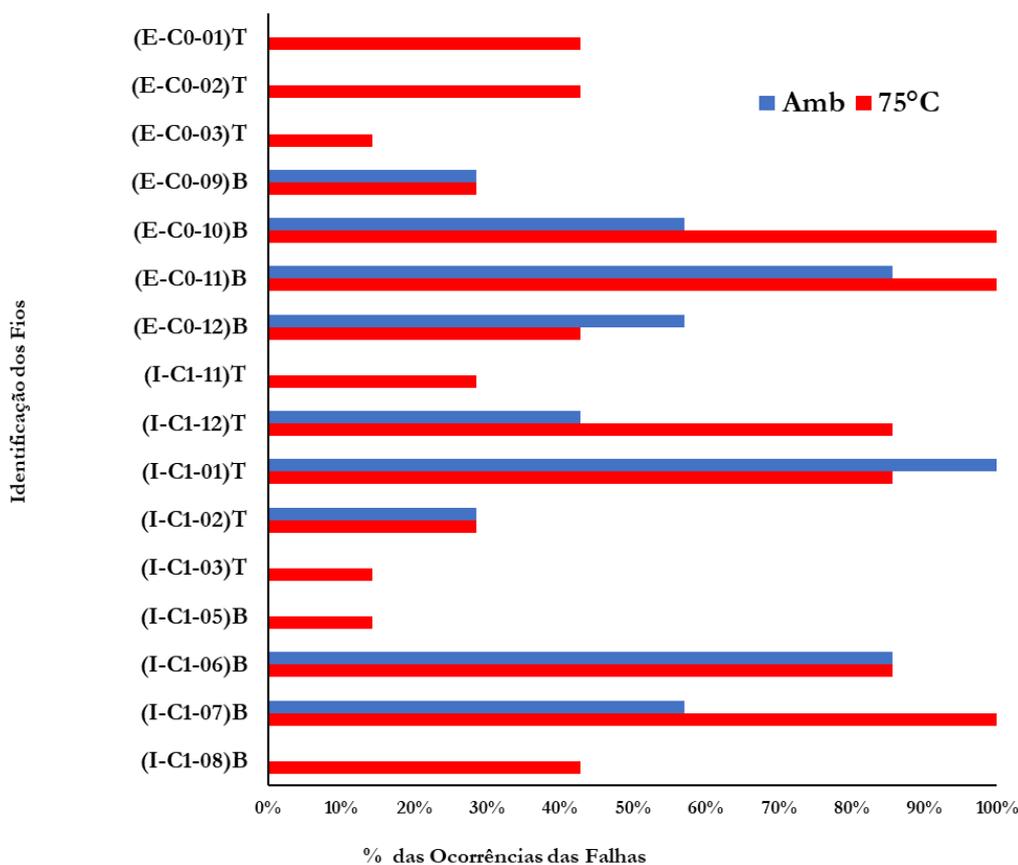


Figura 4-48 – Padrão de repetição de falhas os fios, em temperaturas Amb e 75°C

A figura 4.49 apresenta os percentuais de cada fio interno que falhou, cabe ressaltar que, embora muitas quebras terem ocorridos na camada interna em ambas as temperaturas ensaiadas esta foi a segunda incidência de quebras. A predominância foi nos fios de base. Os fios que mais quebraram em ambos os ensaios foram os fios da base externas (E-C0-09)^B, (E-C0-10)^B, (E-C0-11)^B e (E-C0-12)^B justamente os fios que são colados os extensômetros durante os ensaios. Seguidamente a esta posição, as ocorrências das quebras internas dos fios de topo (I-C1-11)^T, (I-C1-12)^T, (I-C1-01)^T e (I-C1-02)^T, foram observados em menor porcentagem, as ocorrências dos fios de base interno e fio de topo externo. Este estudo foi somente uma prévia para estes mapeamentos, haja vista, que há necessidade de um estudo mais criterioso neste sentido, para um mapeamento com mais propriedade das falhas dos fios.

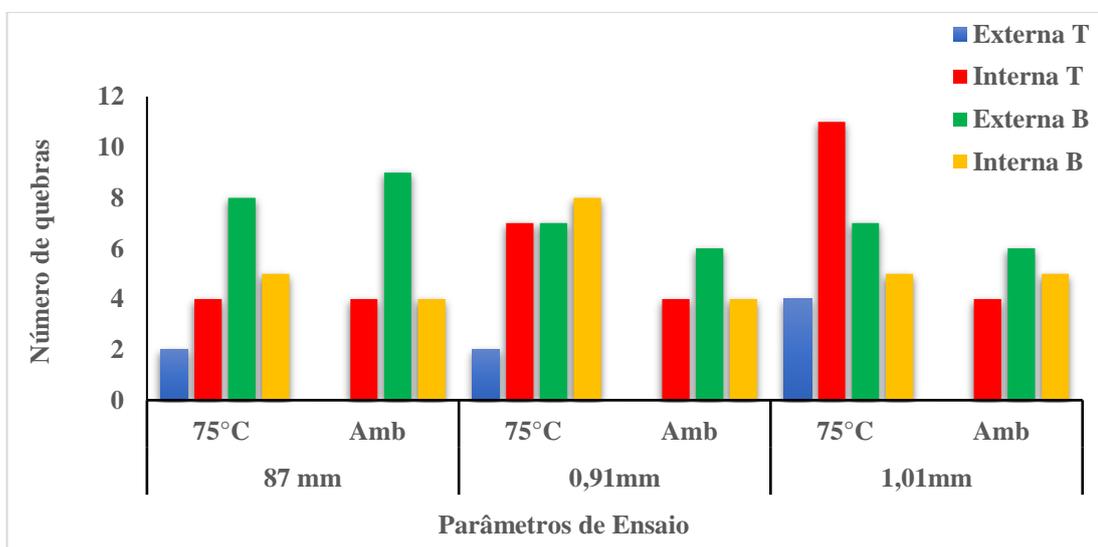


Figura 4-49 – Ocorrências de quebras T e B

Para melhor exemplificar o mapeamento das regiões com maior incidência de falhas, foi realizado um mapeamento para as duas condições estudadas, para a população de amostras, pode se observar na figura 4.50, a) para os ensaios em 75°C e b) em temperatura ambiente, cabe ressaltar que a porcentagem de falhas na camada externa do cabo evidencia o efeito da temperatura para a contribuição dessas falhas, haja vista, que no topo da amostra em temperatura ambiente não ocorreu nenhuma falha. Outro fato evidente é a quantidade de falhas para ambas as condições de ensaios, para a temperatura de 75°C, é expressivo a quantidade superior de quebras em relação aos ensaios realizados em temperatura ambiente O mapeamento completo deste comparativo pode ser verificado no APÊNDICE E.

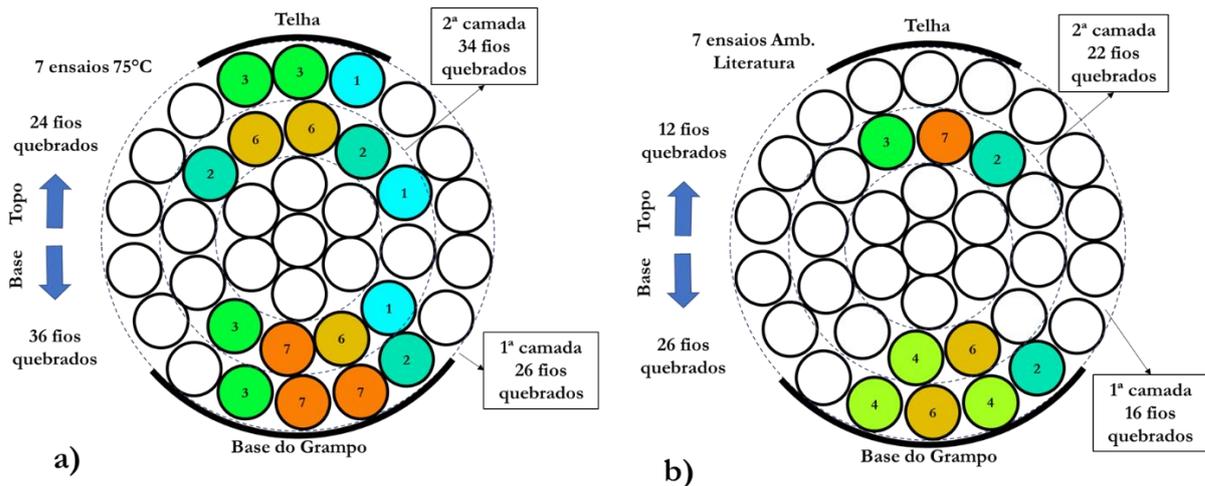


Figura 4-50 – Mapeamento das regiões com maiores incidências de falhas, a) para os ensaios em 75°C e b) em temperatura ambiente

4.4.3 Avaliação Macroscópica das Superfícies de Falha

A análise comparativa dos tipos de superfícies de fratura nos fios rompidos dos ensaios em termos da amplitude também foi realizada para este grupo de amostras e é apresentada nas figuras 4.50, 4.51 e 4.52. As estatísticas são apresentadas separadas por amplitudes e as análises apresentam as porcentagens, onde a comparação foi estabelecida entre as camadas interna e externa, para as temperaturas ambiente e 75°C nas amplitudes de (0,87 mm, 0,91 mm e 1,01 mm). Embora as observações determinaram que o comportamento das ocorrências seja semelhante. Observa-se que o tipo de 45° foi mais predominante nos ensaios em 75°C, assim como os tipo L e V. O tipo quase plano observa em maior percentual nas quebras externas, acontecendo em maior quantidade nos ensaios em temperatura ambiente.

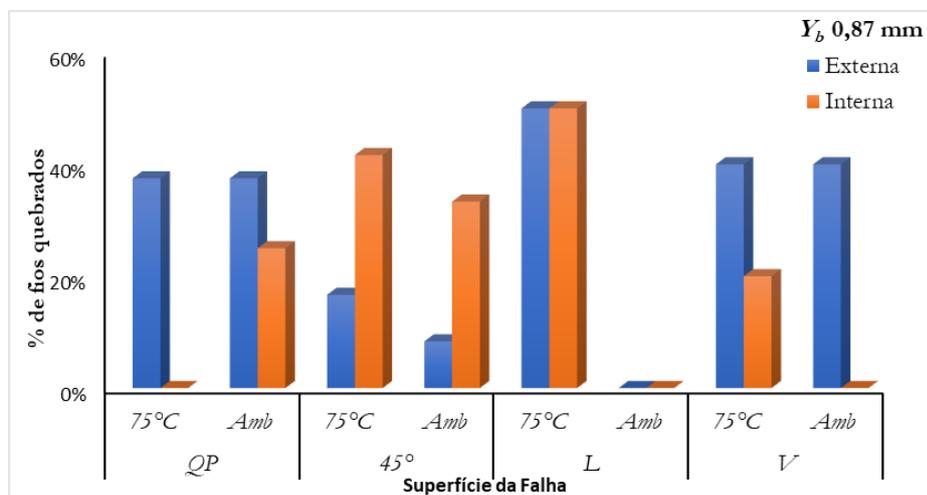


Figura 4-51 – Superfície da Falha para a amplitude 0,87 mm, nas temperaturas ambiente e em 75°C.

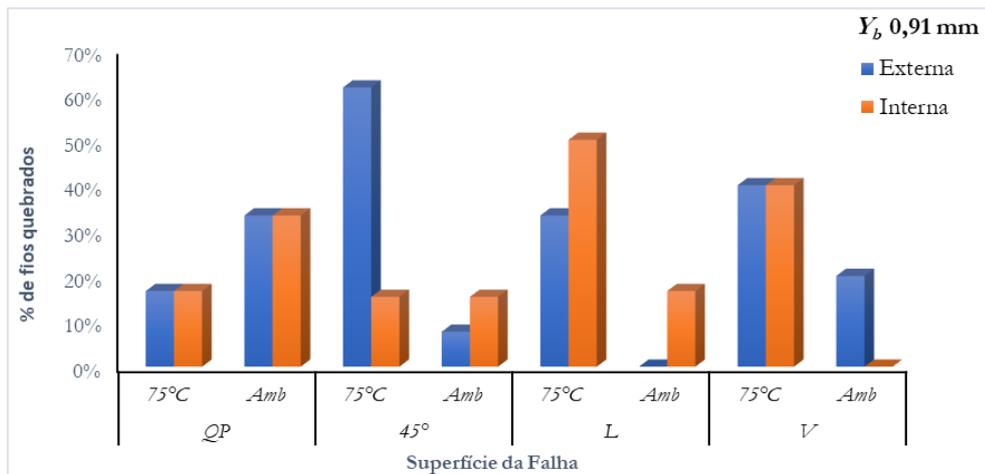


Figura 4-52 – Superfície da Falha para a amplitude 0,91 mm, nas temperaturas ambiente e em 75°C.

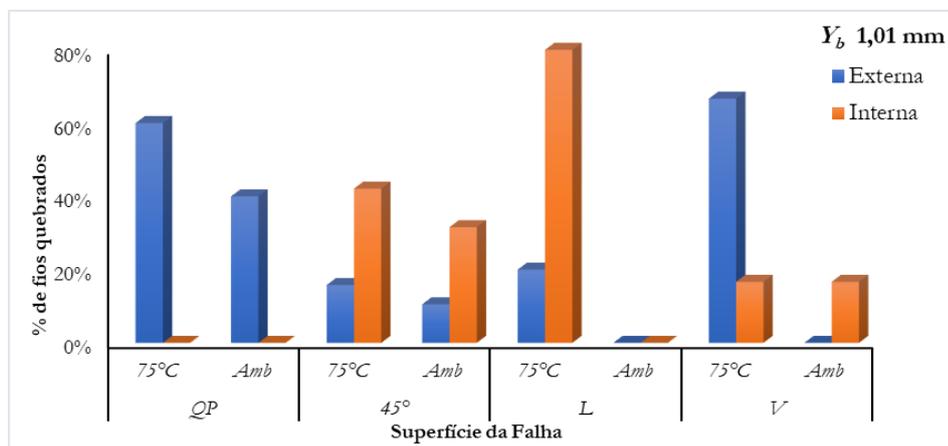


Figura 4-53 – Superfície da Falha para a amplitude 1,01 mm, nas temperaturas ambiente e em 75°C.

A figura 4.54 apresenta o resumo para todas as amplitudes separadas por temperatura e camada, pode se observar que a porcentagem de quebras com superfícies QP aparece em maior porcentagem para os ensaios em temperatura ambiente, para os demais tipos de superfícies aparecem sempre em maior porcentagem em temperatura de 75°C. A figura 4.55 traz as informações sobre a porcentagem do tipo de superfície das falhas para os ensaios nas temperaturas ambiente e em 75°C, desta forma os números fica mais claro quando foi reunido todas as informações com as amplitude e as camadas onde elas ocorreram, pode-se perceber a evidência de 60% das quebras tipo QP é em temperatura ambiente, e 40% em 75°C. Já para os tipos de superfícies em 45°, L e V para a temperatura de 75°C a situação se inverte e a maior porcentagem predominante são para os ensaios realizados em 75°C que apresenta 64%

92% e 75%, das falhas com superfícies em 45°, L e V respectivamente, ficando evidente a maior quantidade para as falhas com superfícies que represente falhas não planas.

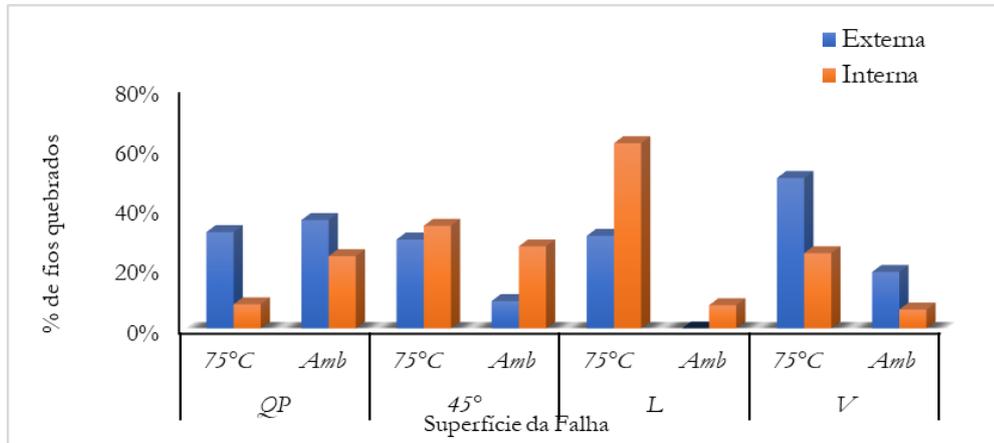


Figura 4-54 – Superfície da Falha para as amplitudes de ensaio, nas temperaturas ambiente e 75°C.

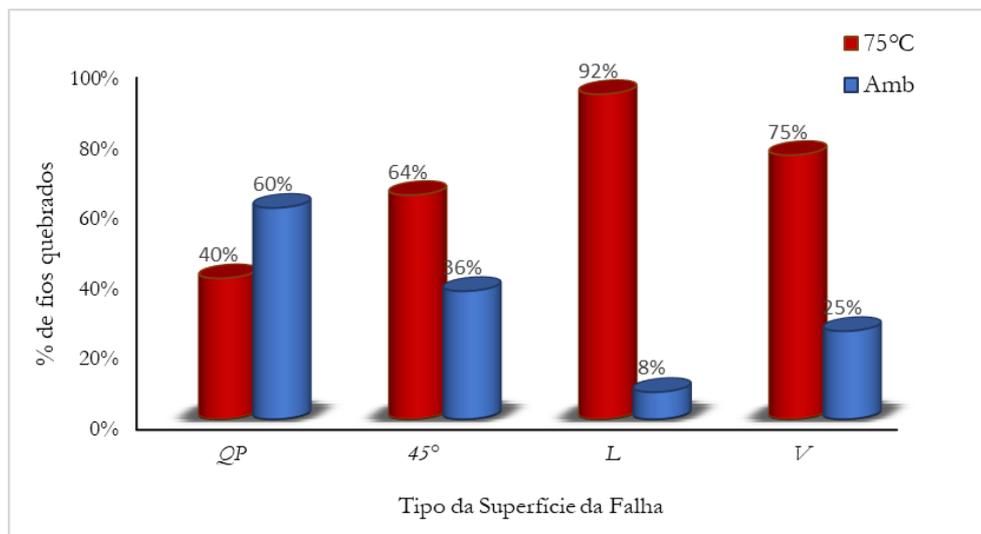


Figura 4-55 – Tipos de Superfície da Falha, nas temperaturas ambiente e 75°C.

CAPÍTULO V

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

5.1 CONCLUSÕES

Neste capítulo são apresentadas as principais conclusões sobre como a temperatura pode afetar a vida em fadiga dos condutores aéreos Orchid, em temperatura máxima de trabalho. Através de método determinístico a Norma Técnica NBR 5422, de fevereiro de 1985 estipula condições para cálculo da Ampacidade, e é fixada uma temperatura máxima admissível para temperatura máxima de trabalho do condutor. Para o cabo Orchid essa condição para cálculo é de 75°C . Nesta pesquisa verificou-se o desempenho do cabo em condições de fadiga nesta temperatura, estabelecendo uma comparação com dados experimentais publicados por (Badibanga 2017) em temperatura ambiente.

Para atingir os objetivos de pesquisa, foi necessário elaborar uma solução de engenharia que reproduzisse a temperatura experimental e fosse capaz de mantê-la constante na região de conexão entre o cabo condutor e o grampo de suspensão (uma das regiões mais suscetíveis a falhas de fadiga nos cabos condutores). Neste sentido, um dispositivo responsável pelo aquecimento e controle de temperatura na região de conexão foi desenvolvido, implementado, testado e usado para as series de ensaios. Com base nos resultados disponíveis na literatura e nos resultados experimentais desenvolvido, somadas às comparações realizadas e obtidos na presente pesquisa, pode-se citar as seguintes conclusões:

- ✓ Foi projetado uma câmara aberta com aquecimento por irradiação infravermelho, que permite realizar ensaios com controle de temperatura em pontos direcionados em uma faixa de 30°C a 150°C sem adequação dos sensores na bancada atual do LABCABOS. Sendo assim, o dispositivo experimental para ensaios de fadiga em cabos condutores aéreos foi desenvolvido com sucesso.
- ✓ A série de testes realizados para avaliar a operação do dispositivo experimental demonstrou excelente desempenho e operação satisfatória. Assim, todos os critérios operacionais foram cumpridos, para realizar o teste de fadiga em cabos sob condições de temperatura controlada na região crítica.

- ✓ Em uma primeira etapa a investigação nas amostras do condutor Orchid foram realizados tendo como base a literatura e nove ensaios de fadiga e temperatura constante de 75 °C. Os resultados foram comparados, e a curva *S–N* exploratória foi construída para o condutor, o que permitiu verificar uma redução da ordem de 30% na vida em fadiga das amostras testadas a temperatura de 75°C, considerando como critério de falha a ruptura de 10% do número total de fios de alumínio.
- ✓ Ainda para as análises da primeira etapa (E1), assumindo a primeira quebra do fio de alumínio como um critério de falha, a redução média na vida do condutor foi de apenas 10%. Esse mesmo comportamento foi observado ao analisar as condições da segunda e terceira quebras de fios. Esta comparação permite afirmar que o levantamento das curvas experimentais comparatórias para a montagem cabo/grampo constitui-se em ferramenta interessante e estratégica para o projeto de linhas de transmissão, bem como estabelecer parâmetros capazes de levar a projetos de recapacitação, manutenção preventiva e corretiva de linhas de transmissão já existente. Considerando estes resultados, observou que há espaço para melhorar as abordagens de projeto em altas temperaturas podendo ser uma ferramenta valiosa para definir novos limites de projeto.
- ✓ Em uma segunda etapa (E2) as análises foram realizadas em sete ensaios, produzindo as amostras em temperatura de 21°C e em 75°C do condutor Orchid. Foi construída a curva *S–N* exploratória para as duas temperaturas estudadas, considerando a primeira quebra do fio de alumínio como um critério de falha. As análises corroboraram com os resultados apresentados na primeira etapa (E1) e apresentou uma redução média de 9% para as três amplitudes ensaiadas.
- ✓ Verificou-se ainda que a quantidade de fios rompidos nos ensaios em temperatura do 75°C foram superiores, e a tendência foi de aumentar a quantidades de falhas para a maior amplitude ensaiada, o mesmo não foi observado nos ensaios em temperatura ambiente.
- ✓ Na análise sobre o mapeamento das recorrências das quebras, foi observado que a região das quebras é relativamente igual para ambas as temperaturas de ensaios, entretanto há uma pequena distinção quanto a ordem das quebras dependendo da amplitude de ensaio. Porém, o mapa da região das quebras se mostrou-se bem claro, sendo possível identificar os fios com maior recorrência de quebras nos ensaios.
- ✓ Foi realizado uma análise do posicionamento das falhas o qual confirmou a ocorrência das falhas no interior do grampo de suspensão. A distância média das falhas apresentou tamanhos menores para as maiores amplitudes ensaiadas.

- ✓ Observou-se nas duas etapas de análises (E1 e E2), que há uma tendência de as quebras ocorrerem primeiro nos fios internos, sejam de topo ou base, seguindo os fios externos de base e por último nos fios de topo externos. Entretanto, em alguns ensaios aconteceu a primeira quebra no fio de base que estão apoiados no grampo de ancoragem, esse comportamento foi observado em maior proporção nos ensaios em temperatura ambiente.
- ✓ A metodologia proposta para verificação de quebras usando extensometria elétrica foi possível identificar cada quebra dos fios externo de forma precisa, e a quantidade exata de ciclos de cada ocorrência. Esta leitura facilita a verificação em tempo real da quantidade de quebras sem a necessidade de abertura da amostra. As quebras internas são identificadas a quantidade de ciclos da ocorrência, entretanto, a identificação exata de cada fio rompido internamente, requer mais estudo. Esta metodologia mostrou-se eficiente na detecção das quebras em tempo real, haja vista, que a região das quebras foi mapeada, permitindo a instalação dos extensômetros nos fios com possibilidade de rompimento durante os ensaios.
- ✓ A análise das falhas permitiu estabelecer os tipos básicos de falhas apresentados na literatura, embora as observações determinaram que o comportamento das ocorrências seja semelhante. Observa-se que o tipo de falha a 45° foi mais predominante nos ensaios em 75°C , assim como os tipo L e V. O tipo quase plano observou em maior percentual nas quebras externas, acontecendo em maior quantidade nos ensaios em temperatura ambiente.

Com base nas observações acima, e apoiado pelas análises dos resultados experimentais obtidos neste estudo, é evidente que a temperatura elevada no conjunto cabo/grampo apresentou clara influência na diminuição da vida em fadiga do cabo Orchid. A pesquisa oferece dados experimentais sobre condições de trabalho do cabo em temperatura máxima de trabalho para condições de cálculo de ampacidade, o que pode colaborar com os dados para projeto de linhas de transmissão contra fadiga devido a vibrações eólicas com temperatura máxima, um dos parâmetros de fadiga que influencia a vida em fadiga dos condutores aéreos. Dito isto, estes resultados podem auxiliar nos critérios para recapacitação e manutenção das linhas de transmissão já instaladas, uma vez que é razoável usar os parâmetros de projetos e dados experimentais sobre a temperatura máxima de projeto para o cabo Orchid.

5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHO FUTUROS

Neste trabalho para além de se ter desenvolvido uma aplicação dos extensômetros para detecção das quebras os quais corroboraram com os seus resultados obtidos nas metodologias já aplicadas na literatura, pode-se estender o estudo a outras vertentes do tema não previstas inicialmente. Partindo do objeto de estudo desenvolvido, é possível apontar outros estudos associados aos parâmetros dos cabos aéreos para LTs. Assim, outros trabalhos ainda são necessários para que todas as implicações e aplicações dessas metodologias apresentadas e discutidas neste estudo sejam totalmente exploradas, como por exemplo:

- ✓ Adequação do equipamento desenvolvido para ensaios em temperaturas acima de $150^{\circ}C$, e execução de ensaios;
- ✓ Ensaios de outros cabos de maneira a contribuir com a formação de um banco de dados experimentais sobre ensaio de fadiga sob efeito da temperatura máxima de trabalho, com informações complementares, para estudos de ampacidade e recapacitação das LTs;
- ✓ Estudo de fadiga usando temperaturas variadas nos cabos de alta tensão sob carregamento dinâmico, tendo como objetivo aproximar a simulação da situação real dos cabos nas linhas de transmissão.
- ✓ Estudo da tensão média no levantamento de curvas S-N pelo menos três patamares de tensão média, visando a influência da temperatura e estabelecimento de um modelo matemático genérico para quantificar a redução da vida em fadiga de montagens cabo-grampo.
- ✓ Estudo de fadiga térmica nos cabos de alta tensão sob carregamento estático, tendo como objetivo o aquecimento direcionado, a fim de baratear o custo dos ensaios possibilitando o estudo de fadiga térmica e fluência em cabos de alta tensão.
- ✓ Uso de extensômetro para mapear os movimentos das quebras internas, de maneira a facilitar a identificação das quebras em tempo real durante o ensaio.
- ✓ Automatizar a identificação das quebras de maneira que o ensaio possa ser interrompido com a detecção automática das falhas pelo uso de extensômetros.
- ✓ Estudo do comportamento do aperto do parafuso de $50 N.m$ na montagem cabo/grampo em ensaios com temperatura elevadas, e suas possíveis mudanças durante o ensaio e influências nas quebras.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abbasi, M. Z., Aman, M. A., Afridi, H. U., & Khan, A. (April de 2018). **Sag-Tension Analysis of AAAC Overhead Transmission lines for Hilly Areas**. *International Journal of Computer Science and Information Security (IJCSIS)*, 16.
- Abbasi, M. Z., Noor, B., Aman, M. A., Farooqi, S., & Karam, F. W. (2018). **An Investigation of Temperature and Wind Impact on ACSR Transmission Line Sag and Tension**. *Engineering, Technology & Applied Science Research*, 8, n 3, 3009-3012.
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas . (1982). **Condutor Elétrico de Alumínio, Retirada e Preparo de Corpo de Prova Para Ensaio de Tipo, Procedimento**.
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas . (1982). **Tensão-Def orxnção em Condutores de Alumínio**.
- ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. (1982). *Fluência em Condutores Elétricos de alumínio Método de ensaio*.
- Abreu, A. M., Saavedra, A. R., Araújo, J. A., Murça, L. B., Fragelli, R. R., Frontin, S. d., & Rêgo, V. B. (2010). **Prospecção e hierarquização de inovações tecnológicas aplicadas a linhas de transmissão** (1ª ed., Vol. I). (C. /. ANEEL, Ed.) Brasília: INOVA.
- Albert, W. A. (1837). 215-234.
- Alexander, c. K., & Sadiku, M. N. (2013). **Fundamentos de Circuitos Elétricos** (5ª ed., Vol. I). (McGrawHil, Ed.) Porto Alegre: AMGH Ltda.
- Altec, A. (2015). **Catálogo Técnico Condutores Elétricos de Alumínio Aluminum Electrical Conductors**. Acesso em 27 de janeiro de 2018, disponível em <https://www.alubar.net.br>:
https://www.alubar.net.br/img/site/arquivo/Cat_Tec_Alubar_Aluminio_2015.pdf
- Alvares, C. A., Stape, J. L., Sentelhas, P. C., Gonç,alves, J. L., & Sparovek, G. (2014). **Köppen's climate classification map for Brazil**. Acesso em 28 de dezembro de 2017, disponível em Open Access Article: http://www.lerf.eco.br/img/publicacoes/Alvares_etal_2014.pdf
- Alvarez, D. L., Silva, F. F., Mombello, E. E., Bak, C. L., & Rosero, J. A. (2018, Oct). **Conductor Temperature Estimation and Prediction at Thermal Transient State in Dynamic Line Rating Application**. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 33(5), 2236-2245.
- Alves, C. C., & Taniguti, J. (2011). **Mecânica Projetos e ensaios mecânicos** (1ª ed., Vol. 1). São Paulo: LTC.
- Ashby, M. F., & Jones, D. R. (2002). **Engineering Materials 1 An Introduction to their Properties and Applications** (2ª ed., Vol. I). University of Cambridge: Butterworth-Heinemann publications.
- Association, T. A. (1971). **A Method of Stress-Strain Testing of Aluminum Conductor and ACSR and A Test Method for Determining the Long Time Tensile Creep of Aluminum Conductors**.

- Åström, K. J., & Hägglund, T. (1995). *PID Controllers: Theory, Design, and Tuning* (2ª ed.). (Instrument Society of America, Ed.) Carolina do Norte.
- Badibanga, R. K. (2017). **Evaluation of the Fatigue Resistance of Power Line Conductors Function of the H/w Parameter.** Universidade de Brasília, Brasília.
- Balbinot, A., & Brusamarello, V. J. (2011). **Instrumentação e Fundamentos de Medidas** (2ª ed., Vol. II). LTC.
- Barbieri, N., & Júnior, O. H. (22-26 de Novembro de 1999). **Ensaio Mecânicos Automatizados De Cabos Condutores.** XV Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica.
- Boresi, A. P., & Schmidt, R. J. (2002). **Advanced Mechanics of Materials** (6ª ed., Vol. I). United States of America: John Wiley & Sons, Inc.
- Borgnakke, C., & Sonntag, R. E. (2010). **Fundamentos da Termodinâmica** (7ª ed., Vol. I). São Paulo: Blucher.
- Brain, R. M., Cohen, R. S., & Knudsen, O. (2007). **Hans Christian Ørsted and the Romantic Legacy in Science** (1 ed., Vol. 241). (R. M. Brain, Ed.) Springer Netherlands.
- Brandtzæg, S. R. (2012). **aluminium environment and society.** Acesso em 29 de Dezembro de 2017, disponível em [www.hydro.com/globalassets: https://www.hydro.com/globalassets/1-english/about-aluminium/files/aluminium_environment-and-society.pdf](https://www.hydro.com/globalassets/1-english/about-aluminium/files/aluminium_environment-and-society.pdf)
- Callister, W. D. (2008). **Fundamentos da Ciência e Engenharia de Materiais** (1ª ed., Vol. 1). Gen / Ltc / Anhanguera.
- Callister, w. D., & Rethwisch, D. G. (2014). **Fundamentos da Ciencia e Engenharia de Materiais Uma Abordagem Integrada** (4ª ed.). Rio de Janeiro: LTC.
- Cardoso, B. R., Comeli, F., Santana, R. M., & Furtado, H. C. (10 de Novembro de 2011). Previsão de vida em tubos de caldeiras com base na medição da espessura da camada de óxido por ultrassom. *Revista Matéria*, pp. 819 – 829. Fonte: SciELO Analytics.
- Castro, R. G. (2013). **Análise Da Fluência E Previsão De Vida Útil Dos Aços ASTM.** São José Del-Rei.
- Cavassin, R. S., & Fernandes, T. S. (dezembro de 2012). **Uma Abordagem Multicritérios Para Recapitação De Linhas De Transmissão.** *Revista Controle & Automação*, 23(6), 749-765.
- Chen, S. L., Black, W. Z., & Loard, H. W. (2002). **High-temperature ampacity model for overhead conductors.** *IEEE Transactions on Power Delivery*, 17(4), 1136-1141.
- CIGRÉ. (1979.). **Recommendations for the Evaluation of the Lifetime of Transmission Line Conductors.** Electra , SC .
- Cigre, S. W. (May de 1985). **Guide for Endurance Test of Conductors Inside Clamps.** *Electra*, 100, 77-86.
- Clayton Alcarde Alvares, J. L. (2014). **Köppen's climate classification map for Brazil.** *Meteorologische Zeitschrift*, No. 6, 711–728.
- Coutrim, A. A. (2013). *Instalações Elétricas* (5ª ed.). São Paulo: Pearson.

- Donald, A. R., P., F. P., & Wright, W. J. (2010). *The Science and Engineering of Materials* (6ª ed., Vol. I). Stamford: Cengage Learning.
- Dorf, R. C., & Bishop, R. H. (2011). **Sistemas de Controle Moderno** (12ª ed.). California: LTC.
- Dowling, N. E. (2012). *Mechanical Behavior of Materials Engineering Methods for Deformation, Fracture, and Fatigue* (4ª ed., Vol. I). (N. E. Education, Ed.) Virginia: Pearson Education.
- Fadel, A. A. (2010). **Avaliação do Efeito de Tracionamento em Elevados Níveis de EDS Sobre a Resistência em Fadiga do Condutor IBIS (CAA 397,5 MCM)**. Universidade de Brasília, Brasília.
- Ferreira, J. L., Fadel, A. A., Araújo, J. A., Murça, L. B., & Henriques, A. M. (24-28 de October de 2011). **Impact Of High Mean Tensile Stress On Aluminum Steel Reinforced Conductors Fatigue Life**. *COBEM*, (p. 10). NATAL.
- Forjasul. (2017). <http://www.forjasul.com.br/pt-br/produtos>. Acesso em 29 de janeiro de 2018, disponível em Forjasul: <http://www.forjasul.com.br/pt-br/>
- Fuchs, R. D. (1977). *Transmissão de Energia Elétrica Linhas Aéreas* (1ª ed., Vol. 1). Rio de Janeiro: LTC/EFEL.
- Fuchs, R. D., Labegalini, P. R., Labegalini, J. A., & Almeida, M. T. (1992). *Projetos Mecânicos das Linhas Aéreas de Transmissão* (2ª ed.). Itajuba: Edgard Blücher Ltda.
- Garcia, A., Spim, J. A., & Santos, C. A. (2012). **Ensaio dos Materiais** (2ª ed., Vol. I). (LTC, Ed.) Campinas: LTC.
- Gasque, K. C. (2016).
- Gaudry, M., Chore, F., Hardy, C., & Ghannoum, E. (1998). **Increasing the Ampacity of Overhead Lines Using Homogeneous Compact Conductors**. *CIGRE SC22-201*, 1-7.
- GEE, S., & CONDER, L. (1985). *A Strain Gauge Manual*. Australia : Aeronautical Research Laboratories.
- Gladman, T. (1997). **The Physical Metallurgy of Microalloyed Steels**. . *The Institute of Materials*, 47-56.
- Gopalan, T. V. (1993). **New excitation system for indoor testing of overhead conductors**. *Journal of Energy Engineering*, 119, 159-167.
- Guo Tong, L. A. (2008). **Fatigue Life Prediction of Welded Joints in Orthotropic Steel Decks Considering Temperature Effect and Increasing Traffic Flow**. *Structural Health Monitoring Institute of Southeast University*, 7(3)(SAGE Publication), 189-202.
- Hammersley. (1964). **Monte Carlo Methods** (1ª ed., Vol. 1). (Wiley, Ed.) U.S.A: Wiley.
- Havard, D., Bissada, M., Fajardo, C., Horrocks, D., Meale, J., Motlis, J., . . . Yoshiki-Gravelsins, K. (1992, Apr). **Aged ACSR conductors. II. Prediction of remaining life**. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 7(2), 588 - 595. doi:10.1109/61.127053
- Henrique, A. M. (MARÇO de 2006). *Bancada de Ensaio Mecânicos à Fadiga de Cabos Condutores de Energia*. Universidade de Brasília, BRASILIA.

- HEREK, O. (Dezembro de 1997). **Bancada De Ensaio Mecânicos De Cabos Condutores A Altas Temperaturas**. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis .
- Hibbeler, R. C. (2010). **Resistências dos Materiais** (7ª ed., Vol. I). São Paulo: Pearson.
- Hoffmann, K. (1989). *An Introduction to Measurements using Strain Gages*. Germany: Druckerei Drach.
- INMET. (2017). <http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=tempo/graficos>. Acesso em 28 de Dezembro de 2017, disponível em INMET - Instituto Nacional de Meteorologia: <http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=tempo/graficos>
- Jerina, K. L., & Paris, P. C. (2000). **Fatigue and Fracture Mechanics: 30th Volume** (Vol. 30). West Conshohocken, PA : ASTM International. doi:10.1520/STP1360-EB
- JONES, D. L. (2001). *Handbook of Viscoelastic Vibration Damping* (Vol. 1). Chandler, Arizona, USA: John Wiley & Sons.
- Jones, D., & Ashby, M. (2011). *Engineering materials I: an introduction to properties, applications and design* (Vol. 4). (B. Heinemann, Ed.)
- Kopsidas, K., & Rowland, S. M. (2009, oct). **A Performance Analysis of Reconducting an Overhead Line Structure**. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2248-2256.
- LABEGALINI, P. R., ALMEIDA, M. T., LABEGALINI, J. A., & FUCHS, R. D. (1992). **Projetos Mecânicos das Linhas Aéreas de Transmissão**. São Paulo: Edgard Blücher.
- LEE, Y.-L., PAN, J. W., HATHAWAY, R. B., & BARKEY, M. E. (2005). *Fatigue Testing And Analysis (Theory and Practice)* (1ª ed.). Oxford UK, United States of America: Elsevier Butterworth-Heinemann.
- Lovrenčić, V., Gabrovšek, M., Kovač, M., Gubelj, N., Šojat, Z., & Klobas, Z. (2015). **The Contribution of Conductor Temperature and Sag Monitoring to Increased Ampacities of Overhead Lines (OHLs)**. *Periodica Polytechnica Electrical Engineering and Computer Science*, 70-77.
- Mannala, O. H. (22 a 25 de Novembro de 2009). **Nova Metodologia para Ensaio de Fluência em Cabos Condutores Com Tempo Reduzido e Confiabilidade de Resultados**. *XX Snpree Seminário Nacional De Transmissão De Energia Elétrica*, pp. 1-7.
- Morgan, V. T. (Janeiro de 1996). **Effect of elevated temperature operation on the tensile strength of over**. *IEEE Transactions Power Delivery*, 11(11).
- MURÇA, L. B. (2011). *Estudo Experimental do Efeito da Sequência de Carregamento*. Departamento de Engenharia Mecânica, Brasília, DF,, Brasília.
- Nefzger. (1933). *Derangements occasionnes par les oscillations mécaniques des conducteurs aériens et leur remède*. CICRE, Paris.
- NEWMAN, M. &. (1999). **Monte Carlo Methods in Statistical Physics** (Vol. 1). (C. Press, Ed.) Oxford: Clarendon Press.
- Nise, N. (2010). *Teoria de Controle*. São Paulo: Atlas.
- Nise, N. S. (2012). **Engenharia de Sistemas de Controle** (6ª ed.). Rio de Janeiro, RJ : LTC.
- Northeast Group, L. (2016, August 30). *Cision Prnewswire*. Retrieved 2019 01, 2019, from <https://www.prnewswire.com/news-releases/global-electricity-transmission-and->

distribution-infrastructure-investment-to-reach-351bn-per-year-by-2026-300320202.html

- Ogata, K. (2011). **Engenharia de controle moderno** (5ª ed.). Pearson.
- Oogi, I., Ito, T., Uino, H., Hase, N., Matuo, H., & K. Takeda. (octobre de 1997). **Conductors for Overhead Transmission Lines in Japan**. *Introduction to OHL Technologies in Japan CIGRE SC22 Meeting*(Colloquium on Environmental Impact of OHL).
- Padilha, A. F. (2000). **Materiais de Engenharia Microestrutura e Propriedades** (1 ed., Vol. 1). (M. P. Gráficas, Ed.) Curitiba: Hemus Livraria, Distribuidora E Editora S.A.
- Pallàs-Areny, R., & Webster, J. (2001). **Sensors and Signal Conditioning** (2ª ed.). Catalonia: Wiley-Interscience.
- Poffenberger, J. C., & SWART, R. T. (1965). **Differential Displacement and Dynamic Conductor Strain**.
- Pytlak, P., Musilek, P., & Lozowski, E. (2009). **Precipitation-based conductor cooling model for dynamic thermal rating systems**. In: *Proceedings of the 2009 IEEE electrical power & energy conference (EPEC)*. IEEE, 1-7.
- Pytlak, P., Musilek, P., Lozowski, E., & Toth, J. (2011). **Modelling precipitation cooling of overhead conductors**. *81*, 2147-2154.
- R. A. Smith, **The Versailles railway accident of 1842 and the first research into metal fatigue, in Fatigue '90**, Vol. IV, EMAS, (1990). IV(EMAS).
- R. Askeland, D., Fulay, P. P., & Wright, W. J. (2010). **The Science and Engineering of Materials** (6ª ed., Vol. I). Stamford: Cengage Learning.
- Ramey, G. E., & Silva, M. (December de 1981). **An Experimental Evaluation of Conductor Aeolian Fatigue Damage Mitigation by Amplitude Reduction**. *IEEE PES Summer Meeting, PAS-100*, 4935-4940.
- Ramey, G. E., Asce, A. M., Duncan, R. R., & Brunair, R. M. (1986). **Experimental Evaluation of S-N Curves for Drake ACSR Conductor**. *Journal of Energy*, *112*(02), 138-151.
- Rosa. (2001). *uma preve liva*. sao paulo: italo.
- Salcas, I. (2015). <http://www.salcas.com.br/>. Acesso em 14 de janeiro de 2018, disponível em Salcas: <http://www.salcas.com.br/termometria>
- Scherer, C. (2005). **Métodos Computacionais da Física** (Vol. 1). (E. L. Física, Ed.) São Paulo: Editora Livraria da Física.
- Scruz, W. (1996). **A History of Fatigue**. *Engineering Fracture Mechanics*, *vol 54* , 263-300.
- Shackelford, J. F. (2008). **Ciências dos Materiais** (6ª ed., Vol. I). São Paulo: Pearson.
- Shigley, J. E., Mischke, C. R., & Budynas, R. G. (2005). **Projetos de Engenharia Mecânica** (7ª ed., Vol. I). Porto Alegre: Bookman.
- Silva, J. B. (2001). **Revista Escola de Minas**. Acesso em 03 de Janeiro de 2018, disponível em [sciELO.br/scielo.php: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0370-44672001000200003](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0370-44672001000200003)
- Simões, M. G., & Shaw, I. S. (2007). **Controle e modelagem fuzzy** (1ª ed.). São Paulo: Edgard Blücher Ltda.

- Skelton, R. P. (1987). *High temperature fatigue Properties and Prediction* (1st edition ed.). (B. L. Data, Ed.) London e New York: ELSEVIER APPLIED SCIENCE. doi:10.1007/978-94-009-3453-5
- Smith, R. A. (1990). *The Versailles railway accident of 1842 and the first research into metal fatigue* (In Fatigue 90 ed., Vol. IV). Birmingham: EMAS.
- Souza, M. T., Haik, R. A., Jardini, J. A., Jardinetti, R. B., Masuda, M., & Y., G. (2011). **Pesquisa para Aumento da Capacidade de Linha em Reserva Florestal e Desenvolvimento de Monitoramento para o Cabo. VI Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica (VI CITENEL)**, (p. 9). São Paulo.
- Souza, M. T., Haik, R. A., Jardini, J. A., Jardinetti, R. B., Masuda, M., Saiki, G. Y., & Kayano, P. S. (Agosto de 2011). **Pesquisa para Aumento da Capacidade de Linha em Reserva Florestal e Desenvolvimento de Monitoramento para o Cabo. VI CITENEL, I**, 1-9.
- Souza, O. H., & Mannala, M. J. (novembro de 2009). **Nova Metodologia Para Ensaio De Fluência Em Cabos Condutores. XX SNPTEE(1)**, 1-7.
- Stephens, R. I., Fatemi, A., R. Stephens, R., & Fuchs, H. O. (2000). **High-Temperature Fatigue**. Em *Metal Fatigue In Engineering* (pp. 373-391). Mexico: A Wiley-Interscience Publication.
- Stephens, R. I., Fuchgs, H. O., & Fatemi, A. (2000). *Metal Fatigue in Engineering* (2^a ed., Vol. I). Mexico and Canada: Interscience Publication.
- Suresh, S. (1998). **Fatigue of Materials**. 1-11.
- Tavares, N. T. (2013). **Condutores aéreos de elevada capacidade – Avaliação de up-rating – Dimensionamento elétrico e mecânico**. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Cidade do Porto.
- The Aluminum Association. (1971). **A Method of Stress-Strain Testing of Aluminum Conductor and ACSR and A Test Method for Determining the Long Time Tensile Creep of Aluminum Conductors in Overhead Lines**. The Aluminum Associatio.
- Theraja, B., & Theraja, A. (2007). *Textbook Of Electrical Technology* (23^o ed., Vol. III). Ohio: S. Chand Limited.
- VANIA. (23 de maio de 2016). *vania.com*. Acesso em 21 de maio de 2016, disponível em <https://www.gmail.com/>: <https://www.gmail.com/>
- Verde, J. A. (2016). *Desenvolvimento de Projeto de Linha Aérea de Alta Tensão – Viabilidade Técnica do Uso de Condutores de Alta Temperatura*. Faculdade De Engenharia Da Universidade Do Porto, Cidade Do Portugal.
- Vidal, G., & Galmard, P. (1973, 01 01). *Test Results of Fatigue at Elevated Temperatures on Aeronautical Materials* (ASTM International ed.). (a. C. A. McEvily, Ed.) West Conshohocken, PA: A. Carden. doi:10.1520/STP38867S
- Vieira, R. E., Badibanga, R. K., Rocha, P. H., Miranda, T. B., Pestana, M. S., Ferreira, J. L., . . . Sousa, A. R. (2017). **Efeito do parâmetro H/w na deformação/tensão dinâmica atuante em um cabo tipo CA. IX Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica (IX CITENEL)**, (p. 9). João Pessoa.

- Voort, G. F. (2004). *ASM Handbook Metallography and Microstructures* (1^a ed., Vol. 9). (George F. Vander Voort, Ed.) Ohio: ASM International.
- Vu, H. V., & Esfandiari, R. S. (1998). *Dynamic Systems Modeling and Analysis* (1^a ed., Vol. I). Singapore: McGraw-Hill.
- W.Schmidt, F., Henderson, R. E., & Wolgemuth, C. H. (2004). **Introdução às Ciências Térmicas, Termodinamica, Dinamica dos Fluidos e Transferencia de Calor** (2^a ed., Vol. I). São Paulo: Edgard Blücher LTDA.
- Wöhler, A. (1860). **Versuche zur Ermittlung der auf die Eisenbahnwagenachsen einwirkenden Kräfte und die Widerstandsfähigkeit der Wagen-Achsen.** *Zeitschrift Fur Bauwesen*, X, 583-616.
- Wöhler, A. (1866). **Resultate der in der Central-Werkstatt der Niederschlesisch-M/irkischen Eisenbahn zu Frankfurt a,d.O. angestellten Versuche fiber die relative Festigkeit von Eisen, Stahl und Kupfer.** *Zeitschriftfür Bauwesen*, 67-84.
- Zhou, Z. R., Goudreau, S., Cardou, A., & Fiset, M. (1996). **Fundamental investigation of electrical conductor fretting fadigue.** *Tribology Internacional*, 221-232.
- Zhou, Z., Goudreau, S., Fiset, M., & A., C. (1995). Single wire fretting fatigue tests for electrical conductor bending gatigue evaluation. *ELSEVIER*, 537-543.

APÊNDICES

APÊNDICE A

Este documento traz instrução direta para a seleção da temperatura de trabalho e manuseio do equipamento de aquecimento controlado.

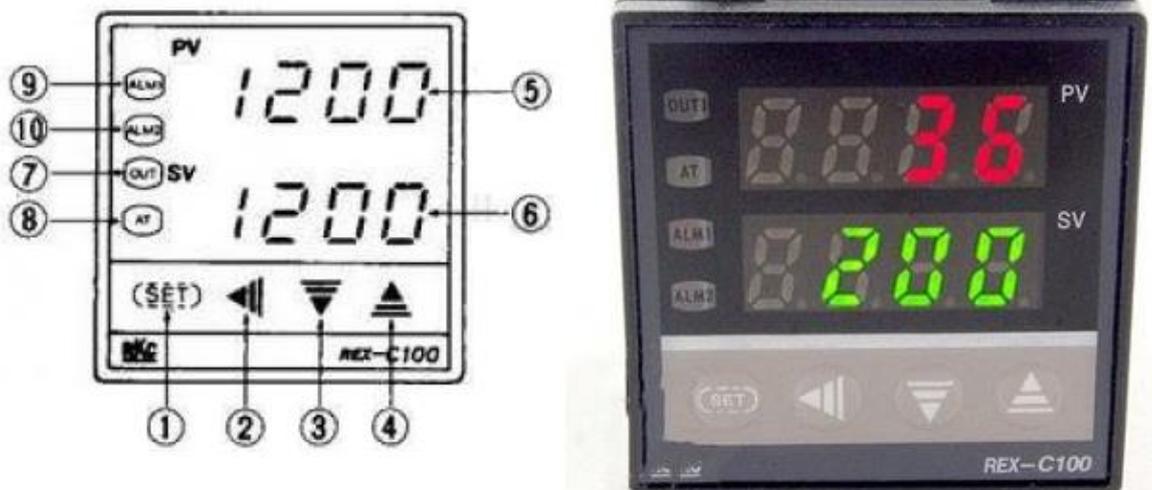


Figura A.1 – Painel de instruções do controlador de aquecimento.

- (1) (Sete key) Usado para definir parâmetros e o de valor da temperatura de entrada.
- (2) (shift key) Cursor de deslocamento para as configurações de temperatura.
- (3) (Down key) Decrementa o valor de entrada.
- (4) (Up key) Aumenta o valor de entrada.
- (5) Exibe o valor medido da temperatura e símbolos de parâmetros.
- (6) Exibe o valor de ajuste, ou seja, a temperatura de *set point*.
- (7) Lâmpada de Autoajuste (*autotuning*) (AT)
- (8) Lâmpadas de controle.
- (9) Lâmpada Alarme 1
- (10) Lâmpada Alarme 2

Para iniciar a operação, deve ter cuidado no manuseio, pois a cabine possui as lâmpadas infravermelho que são de cerâmicas (frágeis). Após o perfeito acoplamento da cabine sobre conjunto cabo/grampo, ligar na tomada monofásica 220 *vrms*. Após ligar o equipamento, selecionar a temperatura de trabalho, seguir os passos:

- i) Pressionar alguns segundos a função (1) até o *display 2* ficar piscando;
- ii) Usar o (2) Cursor de deslocamento para selecionar o dígito.
- iii) Usar (3) para diminuir ou (4) para aumentar o valor da entrada desejada.
- iv) Pressionar (1) após o valor ajustado estiver de acordo.

APÊNDICE B

Temperaturas aferidas nos pontos importantes durante os ensaios

Tabela 7-B – Apresentação tabular das médias das temperaturas

24/07/2018 à 25/07/2018	Temperaturas aferidas (F)	Temperaturas aferidas (F)	Temperaturas aferidas (F)	Temperaturas aferidas (F)
Ensaio 01 (EN-01)				
DATAS e HORAS	Laser ponto 89 mm	Acelerômetro ponto 89 mm	UPC do CE	CE atrás da cabine
24/07/2018 16:37	99,8	87,1	172,5	86,7
24/07/2018 23:27	88,6	98,2	172,9	86,8
25/07/2018 07:03	92	88,3	173,7	88
25/07/2018 16:20	77,1	97,8	168,2	84,5
25/07/2018 22:59	94,2	94,9	170,9	86,8
Média Temperatura em °F	90,34	93,26	171,64	86,56
Média Temperatura em °C	32,41	34,03	77,58	30,31
Média Temperatura em K	305,4	307,0	350,6	303,3

Tabela 8-B – Apresentação tabular das médias das temperaturas

27/07/2018 à 31/07/2018	Temperaturas aferidas (F)	Temperaturas aferidas (F)	Temperaturas aferidas (F)	Temperaturas aferidas (F)
Ensaio 02 (EN-02)				
DATAS e HORAS	Laser ponto 89 mm	Acelerômetro ponto 89 mm	UPC do CE	CE atrás da cabine
27/07/2018 23:04	98,6	97,8	167,4	81,6
28/07/2018 05:42	96,2	91,5	169,9	82,2
28/07/2018 11:55	97,6	97,2	170,4	84,5
28/07/2018 17:54	98,9	97,7	172,9	85,8
28/07/2018 23:53	96,7	98,4	172,1	84,4
29/07/2018 05:48	95,3	90,4	169,2	84,5
29/07/2018 11:46	96,8	98,1	170,7	84,9
29/07/2018 11:48	96,7	98,4	172,1	84,4
30/07/2018 14:09	99,4	100,6	169,4	84,5
30/07/2018 18:53	94,2	90,8	171,3	85,6
31/07/2018 00:22	94	106,6	167,7	81,2
Média Temperatura em °F	96,8	97,0	170,3	84,0
Média Temperatura em °C	35,98	36,14	76,82	28,87
Média Temperatura em K	309,0	309,1	349,8	301,9

Tabela 9-B – Apresentação tabular das médias das temperaturas

07/08/2018 à 10/08/2018 Ensaio 03 (EN-03)	Temperaturas aferidas (F)	Temperaturas aferidas (F)	Temperaturas aferidas (F)	Temperaturas aferidas (F)
DATAS e HORAS	Laser ponto 89 mm	Acelerômetro ponto 89 mm	UPC do CE	CE atrás da cabine
07/08/2018 01:35	93,7	103,9	173,4	85
07/08/2018 08:49	97,3	99	173,4	94,7
07/08/2018 14:47	99,2	95,3	168,8	86,9
07/08/2018 21:15	95,3	95,8	169,4	90,2
08/08/2018 02:46	97,8	97,5	166,6	93,4
08/08/2018 07:36	98,7	99,3	174,9	94,6
09/08/2018 11:46	98,9	94,4	172,7	86,5
09/08/2018 14:52	97,8	95,9	170,6	99
09/08/2018 20:47	97,8	98,5	169,6	86,7
10/08/2018 07:10	95,5	103,9	169,5	87,6
Média Temperatura em °F	97,2	98,35	170,89	90,46
Média Temperatura em °C	36,22	36,86	77,16	32,48
Média Temperatura em K	309,2	309,9	350,2	305,5

Tabela 10-B – Apresentação tabular das médias das temperaturas

25/08/2018 à 26/08/2018 Ensaio 04 (EN-04)	Temperaturas aferidas (F)	Temperaturas aferidas (F)	Temperaturas aferidas (F)	Temperaturas aferidas (F)
DATAS e HORAS	Laser ponto 89 mm	Acelerômetro ponto 89 mm	UPC do CE	CE atrás da cabine
25/08/2018 14:21	103,3	101,9	169,9	95,1
25/08/2018 19:52	102,9	99,3	169,7	89,5
26/08/2018 02:34	101,3	103,3	171,3	99,7
26/08/2018 08:20	100,3	93,9	172,9	96,5
26/08/2018 14:31	103,4	100,1	172,4	93,3
26/08/2018 18:52	102,9	98,8	171,7	91,4
Média Temperatura em °F	102,4	99,6	171,3	94,3
Média Temperatura em °C	39,08	37,53	77,40	34,58
Média Temperatura em K	312,1	310,5	350,4	307,6

Tabela 11-B – Apresentação tabular das médias das temperaturas

04/09/2018 à 06/09/2018 Ensaio 5 (EN-05)	Temperaturas aferidas (F)	Temperaturas aferidas (F)	Temperaturas aferidas (F)	Temperaturas aferidas (F)
DATAS e HORAS	Laser ponto 89 mm	Acelerômetro ponto 89 mm	UPC do CE	CE atrás da cabine
04/09/2018 03:39	98,2	104	167,4	91,2
06/09/2018 05:40	100,1	105,4	172	86,3
06/09/2018 10:17	98	100,5	167,3	85,2
06/09/2018 14:57	100,2	101,4	169,5	87,4
06/09/2018 21:08	97,2	95,2	172,3	92,3
Média Temperatura em °F	98,74	101,3	169,7	88,48
Média Temperatura em °C	37,08	38,50	76,50	31,38
Média Temperatura em K	310,1	311,5	349,5	304,4

Tabela 12-B – Apresentação tabular das médias das temperaturas

09/09/2018 à 10/09/2018 Ensaio 06 (EN-06)	Temperaturas aferidas (F)	Temperaturas aferidas (F)	Temperaturas aferidas (F)	Temperaturas aferidas (F)
DATAS e HORAS	Laser ponto 89 mm	Acelerômetro ponto 89 mm	UPC do CE	CE atrás da cabine
09/09/2018 02:20	98,3	93,8	172,1	84,2
09/09/2018 04:36	98,7	90,5	173,1	86,6
09/09/2018 10:16	100,1	90,6	172,2	89,7
09/09/2018 15:24	100,9	95,5	172	97,5
09/09/2018 21:41	100,5	101,8	167,8	85,5
10/09/2018 00:33	99,8	99,7	171,4	85,9
Média Temperatura em °F	99,7	95,3	171,4	88,2
Média Temperatura em °C	37,62	35,18	77,46	31,24
Média Temperatura em K	310,6	308,2	350,5	304,2

Tabela 13-B – Apresentação tabular das médias das temperaturas

23/09/2018 à 24/09/2018 Ensaio 07 (EN-07)	Temperaturas aferidas (F)	Temperaturas aferidas (F)	Temperaturas aferidas (F)	Temperaturas aferidas (F)
DATAS e HORAS	Laser ponto 89 mm	Acelerômetro ponto 89 mm	UPC do CE	CE atrás da cabine
23/09/2018 02:56	98,2	95,5	172,3	94,9
23/09/2018 08:56	98,7	100,1	170,9	86,1
23/09/2018 14:44	101,4	102,5	168,4	87,1
23/09/2018 21:01	99	105	171,4	82,9
24/09/2018 03:32	96,7	98,4	171,3	84
24/09/2018 09:39	95,5	98,3	173,1	88,6
24/09/2018 15:31	94,9	106,5	171,8	92,2
Média Temperatura em °F	97,8	100,9	171,3	88,0
Média Temperatura em °C	36,5	38,3	77,4	31,1
Média Temperatura em K	309,5	311,3	350,4	304,1

APÊNDICE C

RESULTADO E DISCUSSÃO DO MEMORIAL DOS ENSAIOS

MEMORIAL DOS ENSAIOS RESULTADO E DISCUSSÃO DO MEMORIAL DOS ENSAIOS

Os dezoitos ensaios para composição dos resultados, serão descritos neste APENDICE, onde será apresentado a nova metodologia para a detecção das quebras, através do uso de extensômetros. Sendo assim, em cada memorial aparecerão apenas algum dos gráficos gerados a partir dos sinais captados e analisados. A escolha de limitar a uma figura de cada situação, se dará pelo fato da grande quantidade de imagens geradas nas análises de cada ensaio. De maneira a não carregar de imagens o trabalho escrito. Assim, para cada memorial, serão apresentados o resumo das quebras identificadas e um gráfico de detecção de quebras dos extensômetros.

Serão apresentadas as diferenças entre as falhas internas e externas na E2, onde as quebras são mais evidentes, haja vista, que a quantidades de quebras foram menores. Os gráficos da evolução da tensão experimental de P-S também são detalhadas, para as duas etapas, desta forma são apresentados até mesmo os ensaios que não tiveram quebras, e foi possível verificar o comportamento da tensão média nos ensaios em função do tempo, isso foi feito, para efeito de verificação sobre o comportamento dos extensômetros quando não há quebras.

ENSAIOS DA PRIMEIRA ETAPA (E1) GRUPO DE AMOSTRAS E1-A₁-75°C

Memorial de ensaio EN-10_A₁_1/3_75°C CE-04_E1

O ensaio 10 (EN-10) apesar de ter sido o décimo a ser realizado devido a dinâmica dos ensaios, constitui no primeiro ponto da amplitude de 0,87 mm para compor a curva S-N. o ensaio foi realizado com um CE novo, e teve a parte de fadiga sob efeito da temperatura realizado, nos dias 11 e 12 de outubro de 2018, com início às 00h30, horário que foi finalizado a instrumentação da amostra. A frequência natural de ensaio foi de 23,47 Hz. Após o início do ensaio de fadiga e temperatura, o monitoramento foi realizado periodicamente, e foram inspecionados alguns itens; verificação das linhas de quebras externas e registros de todo o decorrer do ensaio. Aquisição de dados dos lasers indicadores de amplitudes e rotação do cabo, o que indica as quebras foram usados. Concomitantemente com o uso de sete extensômetros

colados nos fios, sendo três no topo e quatro na base do CE. O quadro C-1 apresenta o resumo do ensaio e das quebras.

Quadro C-1 – Resumo do ensaio e das quebras do EN-10_A1_1/3-75°C

EM-10 75°C	11/10/2018 12/10/2018	YB 0,87	Nº [fio]	DMF [mm]	Nº [fio]	DMF [mm]	Nº [fio]	DMF [mm]	Nº [fio]	DMF [mm]
8 Quebras 3,18E+06	externa	4	E-C0-01	(41,96) ^{T-QP}	E-C0-02	(41,95) ^{T-QP}	E-C0-10	33,55 ^{B-V}	E-C0-11	(33,55) ^{B-L}
	interna	4	I-C1-01	(39,67) ^{T-45}	I-C1-02	(38,89) ^{T-45}	I-C1-06	31,11 ^{B-45}	I-C1-07	(29,07) ^{B-V}

Pode se observar que neste ensaio ocorreram oito quebras, com um histórico de três milhões e cem mil ciclos. Sendo quatro quebras externas e quatro quebras internas.

No EN-10, o programa de contagem de ciclos TFC parou de contar durante algumas horas, motivo pelo qual o ensaio teve uma estatística acima de três milhões de ciclos. Apresentou algumas instabilidades na mesa do shake o que interferiu nos sinais captados pelos extensômetros, entretanto isto não o inviabilizou e foi possível fazer a detecção das quebras usando os dados coletados dos extensômetros, juntamente com os dados coletados dos sensores lasers. A figura C-1, apresenta o comportamento dos extensômetros, onde aponta as primeiras quebras internas, antes de ocorrer a quebra externa do fio 10.

Os extensômetros colados no topo e na base da camada externa, traduz movimentos aleatórios em aproximadamente um milhão e cem mil ciclos, o que aponta a primeira quebra interna. A quebra externa é visualizada com mais facilidade, e ocorre a quebra do fio E-C0-01 com 1878538,205 ciclos. O fio E-C0-02 externo do topo quebrou em 2132313,803 ciclos, a quebra do fio E-C0-11 na base em 2926879,456 ciclos e quebra do fio E-C0-10 em 3048126,46 ciclos. Para as quebras externas a identificação é realizada de forma expressiva, através da leitura do gráfico da figura C-2. O quadro C-2, está sumarizado a quantidade de ciclos em que cada quebra externa ocorreu, sendo facilmente observadas. É fácil verificar que houve as quebras quase que simultaneamente dos fios 1, e 2 do topo do CE.

Dito isto, foi viável identificar as quebras internas através do comportamento dos sinais dos extensômetros. Sendo assim, foi possível confirmar a primeira quebra com 1126730,774 ciclos, a segunda quebra em 1539546,204 ciclos, terceira quebra 1624925,643 ciclos, quarta quebra 1877696,29 ciclos, a quinta quebra 2131471,88 ciclos, a sexta quebra 2512973,546 ciclos, 2461248,038 ciclos, a sétima quebra 2926879,456 ciclos, e a oitava quebra com 3048126,46 ciclos. Devido à quantidade de fios quebrados, não foi contestável qual fio quebrou em cada ocorrência interna. Mas praticável verificar a ocorrência da quebra interna e a quantidade de

ciclos em que cada evento de quebra ocorreu, e é apresentado no quadro C-2. E no quadro C-3 as descrições das quebras ocorridas na camada externa.

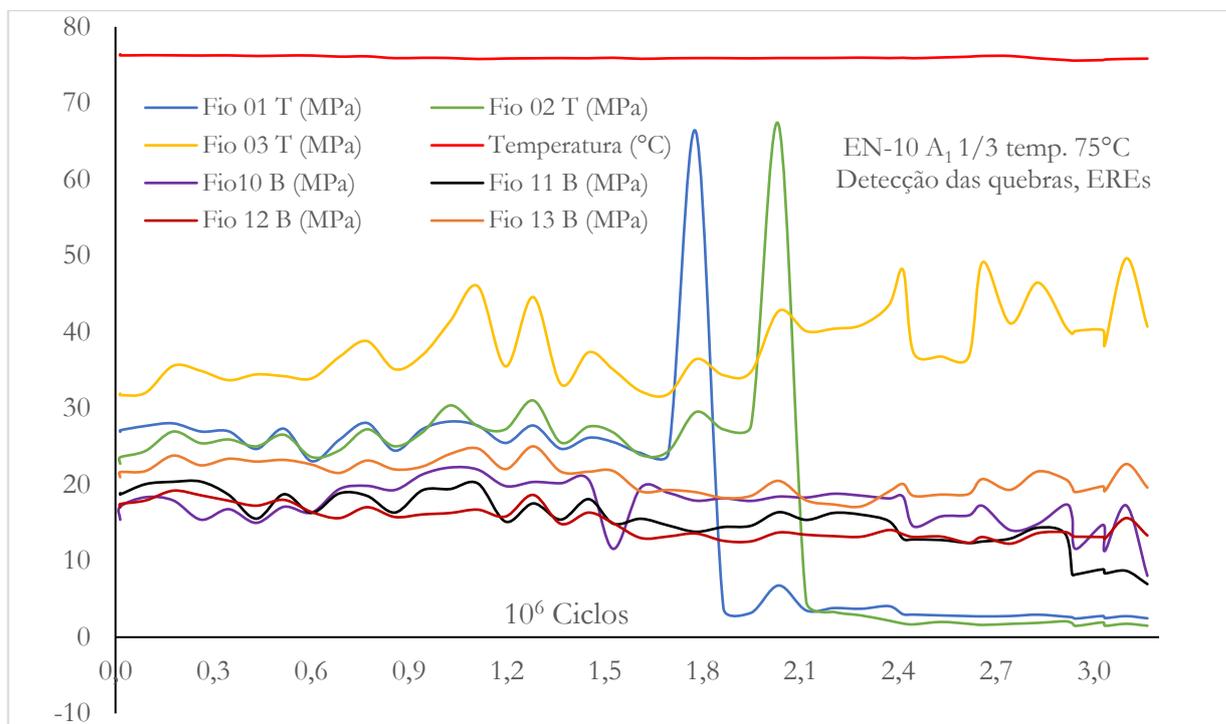


Figura C-1 – Detecção das quebras pela leitura dos extensômetros colados no CE.

Quadro C-1 – Ordem das quebras e quantidade de ciclos

EN-10. Quebras	Ciclos	Ciclos
1ª quebra	1126730,774	1,13E+06
2ª quebra	1539546,204	1,54E+06
3ª quebra	1624925,643	1,62E+06
4ª quebra	1877696,29	1,88E+06
5ª quebra	2131471,88	2,13E+06
6ª quebra	2461248,038	2,46E+06
7ª quebra	2926879,456	2,93E+06
8ª quebra	3048126,46	3,05E+06

Quadro C-2 – Descrições dos fios rompidos na camada externa

EN-10 Quebras	Fio	Fio	DMF (mm)	Ciclos	Ciclos
4ª quebra	E-C0-01	01 ext. T	(41,96) ^{T-QP}	1877696	1,88E+06
5ª quebra	E-C0-02	02 ext. T	(41,95) ^{T-QP}	2131472	2,13E+06
7ª quebra	E-C0-11	11 ext. B	(33,55) ^{B-L}	2926879	2,93E+06
8ª quebra	E-C0-10	10 ext. B	(33,55) ^{B-V}	3048126	3,05E+06

Além dos registros das quebras serem realizados pelos extensômetros, foram utilizados os lasers para fazer os mesmos registros. Isto foi feito através dos dados captados via software

AqDados. Os dados foram aquisitados de forma contínua, com o uso de um aquisitor de dados, ADS 1800 e usando o software da Lynx, configurado para registro de uma hora de duração cada pacote de dados, e frequência de 500Hz. Foi gerado a partir das estatísticas dos sinais coletados, a metodologia de plotagem dos sinais é a forma usada pelos pesquisadores no laboratório para a interpretação das quebras. Houve a reprodução da estatística dos sinais coletados pelos lasers, a média e máximo-mínimo, o que confirmam as quebras já identificadas, isto pode ser conferido no gráfico das figuras C-2 ilustra a detecção das quebras, nos sinais dos lasers, e mostra a evolução dos sinais durante a ocorrência de cada quebra.

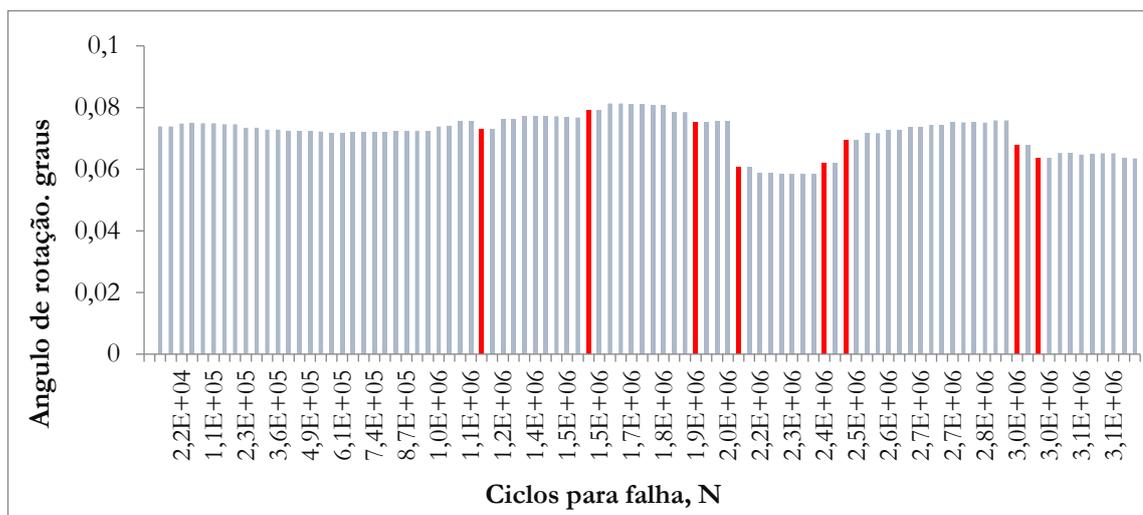


Figura C-1 – Detecção das quebras, sinais dos lasers

O gráfico foi gerado a partir dos dados captados pelos lasers, onde mostra a evolução das quebras captados a partir do ponto 89 mm e na régua de rotação do CE, a fim de corroborar com a identificação das quebras realizadas pela leitura dos sinais captados pelos extensômetros. Pode-se perceber que a figura C-2, mostra a evolução dos movimentos nos fios do CE em função do tempo, das deformações captadas pelos extensômetros. Cada quebra pode ser confirmando e sinalizadas pelo gráfico de detecção das quebras pelos extensômetros.

Entretanto, foi observado a movimentação em momentos distintos no CE, para alguns casos, pois nem sempre a movimentação do CE aconteceu no momento exato em que ocorreu a quebra, o que pode induzir contagem tardia de ciclos na identificação das quebras através dos sinais captados pelos lasers. Neste ensaio, é identificável as quebras, os resultados foram comparados. As redundâncias dos registros dos sinais captados, comprovaram as quebras com o auxílio dos gráficos produzidos com os sinais captados pelos extensômetros, conforme mostrado nos

gráficos das figuras C-3, também foi possível verificar que no ponto oposto ao UPC a temperatura de 75°C foi mantida constante em todo o decorrer do ensaio.

Foi apresentado o comportamento da tensão experimental de cada fio ao longo do ensaio, e a tensão teórica de P-S na figura C-3 apresenta a tensão experimental nos fios x P-S. À medida que o ensaio evoluiu, o erro mudou de acordo com a movimentação dos fios, uma vez que na formulação de P-S, o cabo é considerado como uma viga rígida em sua formulação, sendo assim, a tendência é acontecer os deslizamentos dos fios internamente, em função do tempo. Neste ensaio, o erro entre a tensão experimental de P-S nos fios durante o ensaio se manteve dentro do tolerável para validação do ensaio até a ocorrência das primeiras falhas externas, após isso o erro cresceu circunstancialmente.

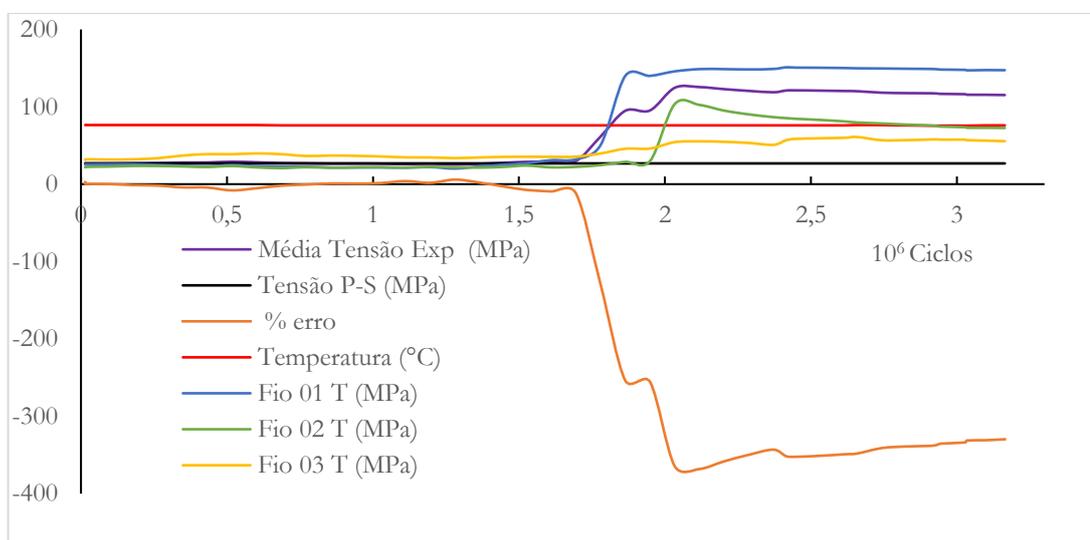


Figura C-2 – Tensão de P-S x Tensão experimental nos fios em função do tempo.

A amplitude de deslocamento Y_b é aplicada no cabo durante a realização do ensaio, em todo ensaio desta pesquisa. Além disso, foi realizado o monitoramento do comportamento das tensões médias dos três fios de topo do CE. Assim, foi possível verificar a amplitude de deslocamento, traduzida em tensão média, variável monitorada durante o ensaio, através dos extensômetros colados no topo do CE.

Memorial de ensaio EN-02_A1_2/3_75°C CE-01_E1

O ensaio (EN 02) foi o segundo a ser realizado para a pesquisa e constitui na repetição do ensaio da primeira amplitude da curva S-N. Foi iniciado a parte de fadiga e temperatura no dia 27/07/2018, às 23h35, horário quando foi finalizada a instrumentação da amostra. Optou se por fazer os ensaios no turno noturno, devido ao laboratório apresentar pouca variação de

temperatura em seu interior, o que diminui as variáveis inesperadas de ensaio. Após o início do ensaio de fadiga e temperatura, o monitoramento foi realizado de 6 em 6 horas, e foram inspecionados alguns itens; como fotos da condição térmica de temperatura no ponto de controle, periférico da amostra, verificação das linhas de quebras externas, registros fotográficos e sonoros de todo o decorrer do ensaio. A frequência inicial foi de 19,14 Hz, apresentando pequena variação a cada varredura. As temperaturas aferidas com o termovisor, conforme descrito no capítulo 3, corroboram com as temperaturas medidas com o termopar e coletadas com aquisitor de dados durante a execução do ensaio. Neste foram colados três extensômetros no topo da amostra, além de fazer a validação do ensaio pela fórmula de $P-S$, estes extensômetros foram utilizados para verificar o comportamento da tensão média durante todo ensaio e verificação de quebras. A detecção das quebras também foi monitorada pelo uso do programa para detecção de quebras (TFC), entretanto não foi possível verificar as quebras internas com clareza, o que motivou o uso dos extensômetros na base.

Conforme descrito no capítulo 2, o Y_b é medido no ponto de controle do ensaio, localizado a 89 mm do último ponto de contato (UPC) entre o cabo e o grampo de suspensão, como prescreve a teoria na qual está embasada a Fórmula de Poffenberger-Swart ($P-S$), neste mesmo ponto foi mantido a temperatura constante de 75°C, conforme figura C-11 e 5-12. Também é possível verificar que em todo o decorrer do ensaio a temperatura de 75°C se manteve constante.

Neste ensaio, embora o histórico de ciclos ficasse na casa de três milhões de ciclos, só ocorreram quatro quebras, a primeira quebra aconteceu internamente, com aproximadamente novecentos e setenta mil ciclos, este registro só foi possível devido ao uso dos extensômetros para a detecção das quebras. O quadro C-5 apresenta o resumo das quebras, e a posição da quebra em relação a borda do grampo. Pode-se observar que as quebras da camada interna C1 ocorreram primeiro, isso pode ser verificado na figura C-5, onde os extensômetros colados na camada externa sobre o fio 02, aumenta a tensão bruscamente. É possível acompanhar a evolução da tensão experimental $P-S$ nos fios durante o ensaio. Houve uma interrupção durante sua execução, acontecendo maior tempo para sua finalização, com isso, ao todo foram quatro dias de ensaio, o que pode ter apresentado variação nos sinais captados dos extensômetros e demais transdutores. As detecções das quebras foram realizadas através da leitura dos sinais de apenas três extensômetros colados no topo da amostra, e os sinais dos lasers usando a ferramenta de detecção de quebras TFC.

Na figura C-4 é possível perceber as mudanças nos sinais dos fios 1 e 2 no topo do CE, após novecentos mil ciclos, o que sugere a primeira quebra interna, pois a linha que sinaliza a quebra externa, não havia mudado. Neste ensaio, com o uso de apenas três extensômetros no topo, ficou mais difícil identificar as quebras dos fios externos da base do cabo. Entretanto, a detecção das quebras externas, foram possíveis, mediante a inspeção visual, através das linhas de quebras e dados coletados dos lasers. Pelo gráfico da figura C-5, confirmam as ocorrências das quebras internas nos fios 12 e 01 no topo (T) do CE, com 967343,4964 e 1353812,513, e quebras externas dos fios 10 e 11 da base (B) em 2210559,758 e 2765416,157 ciclos respectivamente, sumarizado no quadro C-4 e C-5. A identificação das quebras de cada fio, só foi possível neste ensaio devido a pequena quantidade de fios rompidos. A segunda e a terceira quebra foram detectadas pela inspeção visual através da linha de quebra, o que se confirmou pelos sinais captados pelos transdutores.

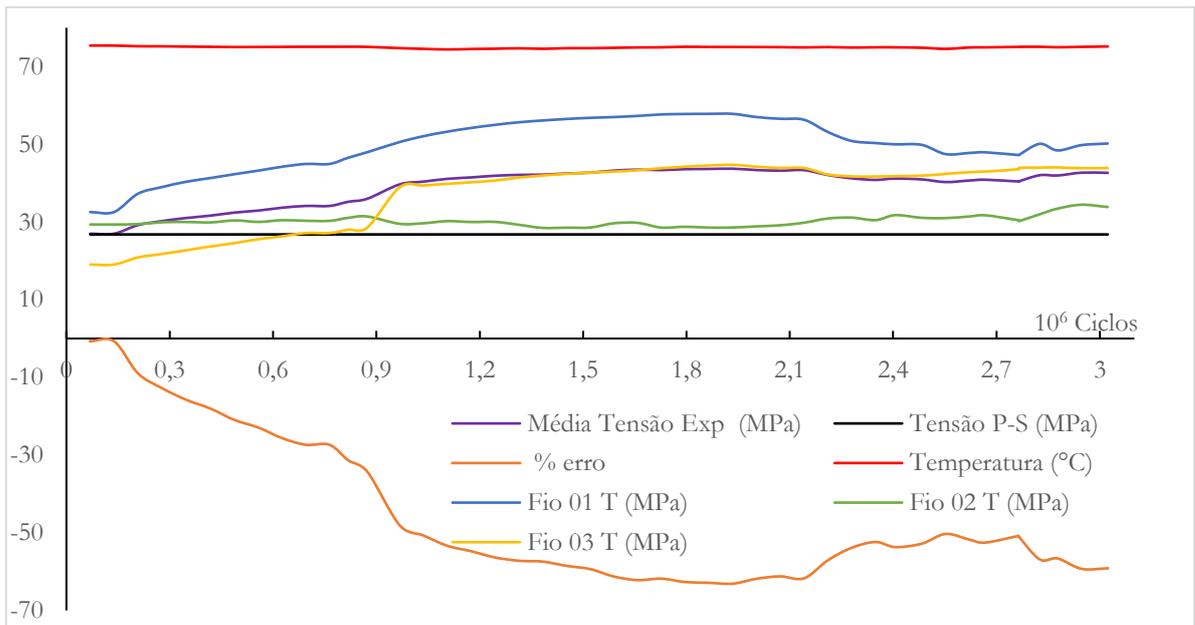


Figura C-4 – EN-02_A1 2/3_75°C. Tensão Experimental nos fios x P-S durante o Ensaio

Quadro C-3 – Resumo das quebras do EN-02_A1 2/3-75°C.

EN-02 75°C	27/07/2018 31/07/2018	YB 0,87	Nº [fio]	DMF [mm]	Nº [fio]	DMF [mm]	Nº [fio]	DMF [mm]
4 Quebras $3,07E+06$	externa	2	E-C0-10	(37,75) ^{B-QP}	E-C0-11	(34,6) ^{B-QP}		
	interna	2	I-C1-12	(40,71) ^{T-45}	I-C1-01	(36,87) ^{T-45}		

Como o monitoramento dos sinais captados pelos lasers foi realizado durante todo o ensaio, a percepção visual das mudanças ocasionadas pelas quebras externas foi percebida e confirmada

pela redundância de dados captados pelos lasers. Na figura C-5, é possível perceber as quebras ocasionadas neste ensaio, pela leitura dos sinais captados pelos lasers na régua de rotação e na amplitude do ponto 89 mm do CE (o sinal do eixo y foi ampliado, sem unidade quantitativa representáveis). As quebras foram inspecionadas nos gráficos gerados pelos sinais captados pelos lasers e das deformações dos três extensômetros colados no topo do CE.

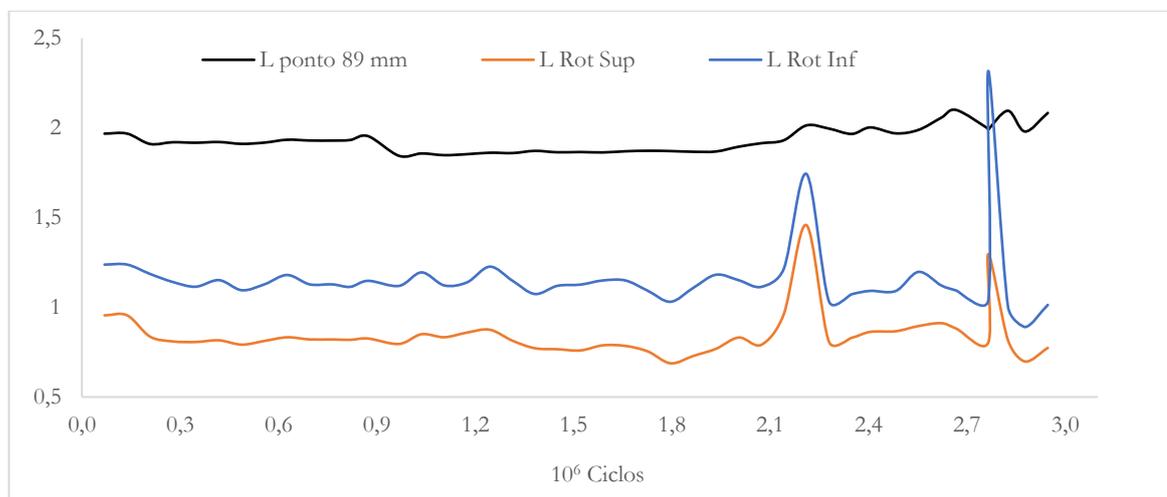


Figura C-3 – Detecção das quebras, pela leitura dos lasers, EN-02 A1 2/3

Quadro C-4 – Identificação das quebras e quantidade de ciclos N. EN-02_A1 2/3_75°C.

EN-02. Quebras	Fio	Fio	DMF (mm)	Ciclos	Ciclos
1ª quebra	I-C1-02	02 int. T	(40,71) ^{T-45}	967343,4964	9,67E+05
2ª quebra	I-C1-12	12 int. T	(36,87) ^{T-45}	1353812,513	1,35E+06
3ª quebra	E-C0-11	11 ext. B	(33,92) ^{B-QP}	2210559,758	2,21E+06
4ª quebra	E-C0-10	10 ext. B	(36,45) ^{B-QP}	2765416,157	2,76E+06

Memorial de ensaio EN-09_A1_3/3_75°C_CE03_E1

O ensaio 09 (EN 09) apesar de ter sido o nono ensaio a ser realizado, ele faz parte da primeira amplitude de 0,87mm para compor a curva $S - N$, sendo o terceiro ensaio. Foi realizado, nos dias 04 e 05 de outubro de 2018, com início às 17h35, horário que foi finalizado a instrumentação da amostra. A frequência natural de ensaio foi de 23,50 Hz. Após o início do ensaio de fadiga e temperatura, o monitoramento foi realizado periodicamente, e foram inspecionados alguns itens; verificação das linhas de quebras externas, registros fotográficos e sonoros de todo o decorrer do ensaio. Os dados foram gravados através de dois ADS 1800. Neste ensaio seis extensômetros foram colados nos fios, sendo três no topo e quatro na base do CE. Pelo quadro C-6 é possível verificar o resumo das estatísticas do EN-09, teve uma quantia

de dois milhões e setecentos mil ciclos, quatro quebras externas e três internas. As quebras externas são identificadas com facilidade, enquanto para a precisão de qual fio interno quebrou, exige um estudo mais aprofundado dos sinais gerados dos gráficos. Porém, é possível identificar em quantos ciclos ocorreram as quebras internas.

Pela inspeção visual, foi observada a primeira quebra externa, em aproximadamente um milhão e trezentos mil ciclos, isto fica visível no gráfico da figura C-7, que o fio 11 da base mudou bruscamente o seu comportamento, sinalizando o seu rompimento. Entretanto, antes dessa quebra, é observável uma quebra interna sinalizado pelos sinais captados pelo conjunto de extensômetros colados nos fios externos. Logo na sequência houve o rompimento do fio 10, e alguns ciclos após o rompimento do fio 9, todos os três fios da base da camada externa. As evoluções das quebras foram confirmadas nos gráficos a partir dos sinais coletados dos extensômetros, no APÊNDICE C é possível acompanhar a primeira quebra interna, e em seguida as quebras externas, que é facilmente percebida pelos sinais gravados durante o ensaio. Juntamente pode verificar os sinais dos lasers, do ponto 89 mm e dois das régua de detecção. A partir dos sinais captados pelos extensômetros, e lasers, foram plotados no Excel os gráficos de todas as quebras. O gráfico da figura C-6 foi gerado a partir dos sinais de desvio padrão das deformações registradas nos fios do CE, o que facilitam a identificação das quebras apresentada no quadro C-7. As quebras externas ficaram evidentes nas quatro ocorrências, quebrando quase que simultaneamente, os fios 11, 10 e 09 da base. O fio 12 foi o último fio externo a se romper com aproximadamente dois milhões e setecentos mil ciclos.

Quadro 0-5 – Resumo das quebras do EN-09_A1 3/3_75°C.

EN-09 75°C	04/10/2018 05/10/2018	YB 0,87	Nº [fio]	DMF [mm]	Nº [fio]	DMF [mm]	Nº [fio]	DMF [mm]	Nº [fio]	DMF [mm]
7 Quebras 2,74E+06	externa	4	E-C0-09	(37,16) ^{B-45}	E-C0-10	(33,46) ^{B-V}	E-C0-11	3,08) ^{B-QP}	E-C0-12	(33,96) ^{B-45}
	interna	3	I-C1-06	(26,09) ^{B-45}	I-C1-07	(34,02) ^{B-45}	I-C1-08	37,50) ^{B-L}		

Pode se observar as quebras identificadas pelo gráfico a primeira quebra aconteceu em 1121193,82 ciclos, a segunda quebra 1290720,468 ciclos, a terceira quebra 1375515,264 ciclos, quarta quebra 1455857,22 ciclos, a quinta quebra 2172791,083 ciclos, a sexta quebra 2478847,852 ciclos e a sétima quebra com 2655649,807 ciclos e está sumarizado no quadro C-8. Já no quadro C-9 é apresentado os detalhes das quebras ocorridas e a quantidade de ciclos para as quebras externas. Desse modo, além dos registros realizados pelos extensômetros, foram utilizados os lasers para os registros das quebras, realizado através de dados captados via software TFC. Além disso, os dados foram aquisitados de forma contínua, com o uso de um

aquisitor de dados, ADS 1800 e usando o software *AqDados 7.0* da *Lynx*, configurado para registro de uma hora de duração cada pacote de dados e frequência de 500Hz, alguns quadros dos pacotes aquisitados durante o ensaio são mostrados no APÊNDICE C. Os resultados foram comparados, a redundância dos registros dos sinais captados, comprovam algumas quebras, principalmente as quebras externas. Entretanto não é possível precisar todas as quebras internas de maneira clara, após a ocorrência da primeira.

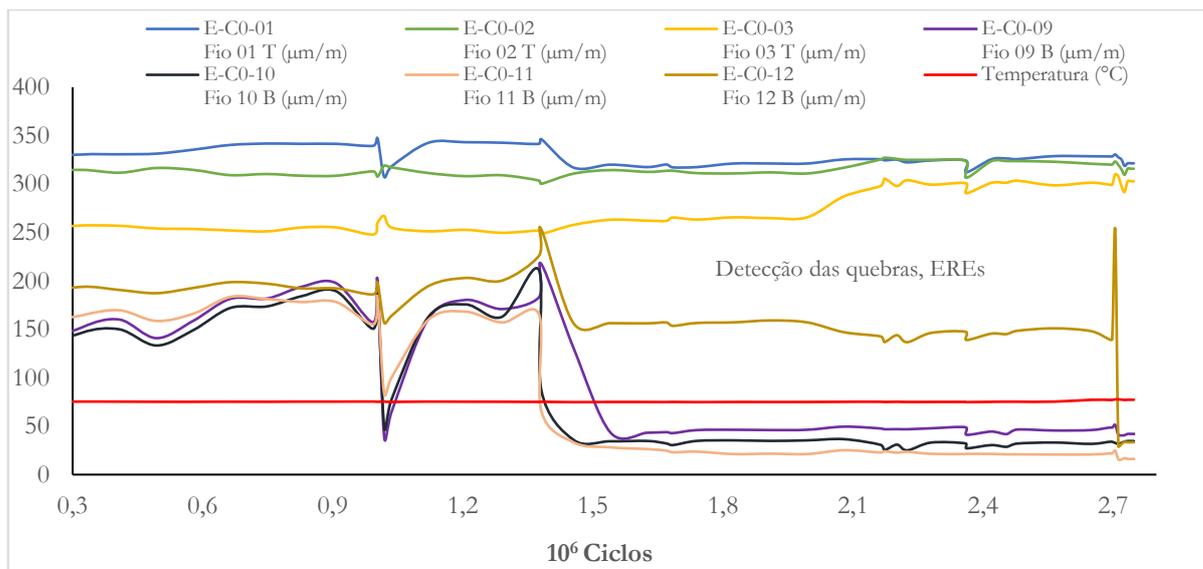


Figura C-4 – Detecção das quebras, sinais dos extensômetros colados nos fios externos. EN-09_A1_3/3_75°C

Quadro C-6 – Ordem das quebras e quantidade de ciclos

EN-09 Quebras	Ciclos	Ciclos
1ª quebra	1121193,82	1,04E+06
2ª quebra	1290720,468	1,29E+06
3ª quebra	1375515,264	1,38E+06
4ª quebra	1455857,22	1,46E+06
5ª quebra	2172791,083	2,17E+06
6ª quebra	2478847,852	2,48E+06
7ª quebra	2655649,807	2,66E+06

Quadro C-7 – Descrições dos fios rompidos na camada externa

Quebras	Fio	Fio	DMF (mm)	Ciclos	Ciclos 10 ⁶
2ª quebra	E-C0-11	11 ext. B	(33,08) ^{B-QP}	1290720,468	1,29E+06
3ª quebra	E-C0-10	10 ext. B	(33,46) ^{B-V}	1375515,264	1,38E+06
4ª quebra	E-C0-09	09 ext. B	(37,16) ^{B-45}	1455857,22	1,46E+06
7ª quebra	E-C0-12	12 ext. B	(33,96) ^{B-45}	2655649,807	2,66E+06

Conforme mostrado nos gráficos gerados pelos dados captados pelos lasers, figuras C-7. é possível verificar na figura uma pequena e sutil ondulação na marca de aproximadamente um

milhão de ciclos, o que sugere a ocorrência da primeira quebra interna. O gráfico foi gerado a partir dos mesmos sinais do laser, usando a segunda forma da aquisição de dados conforme supracitado. É perceptível que a primeira quebra, aparece de uma forma bem discreta no gráfico de detecção das quebras pelos lasers, porém as externas são mais evidentes. Todavia, há eventos de quebras simultâneas que não são mostradas com clareza, dificultando assim a quantização dos ciclos para cada quebra, o que pode dificultar a interpretação dos dados coletados apenas com os lasers. No EN-09, só foi possível identificar a primeira quebra interna, pela leitura dos gráficos gerados pelos usos dos extensômetros.

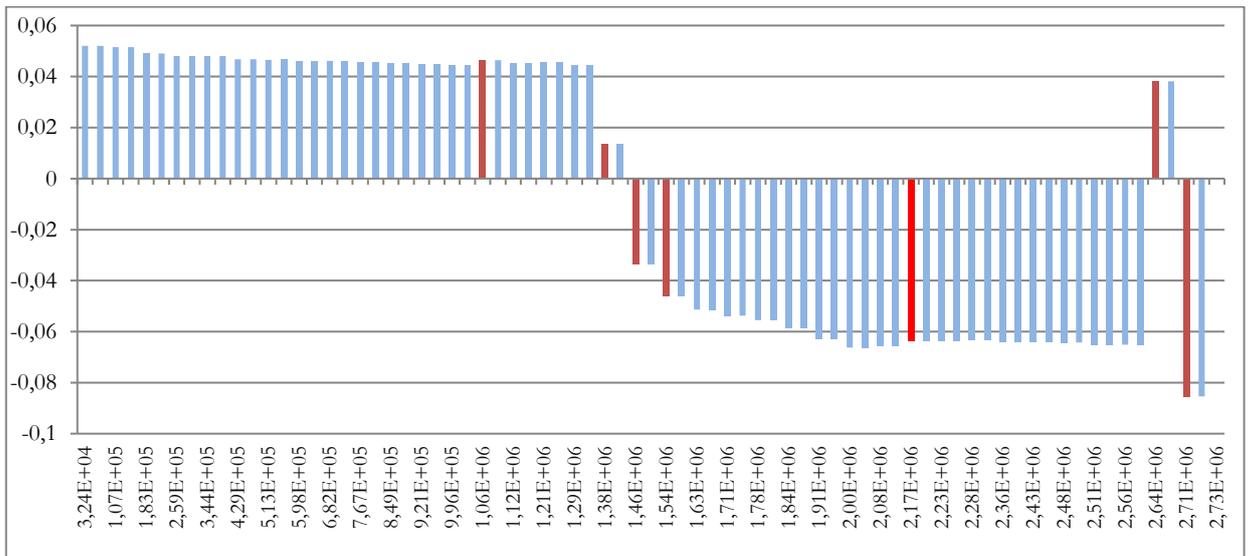


Figura C-5 – Detecção das quebras, sinais dos lasers

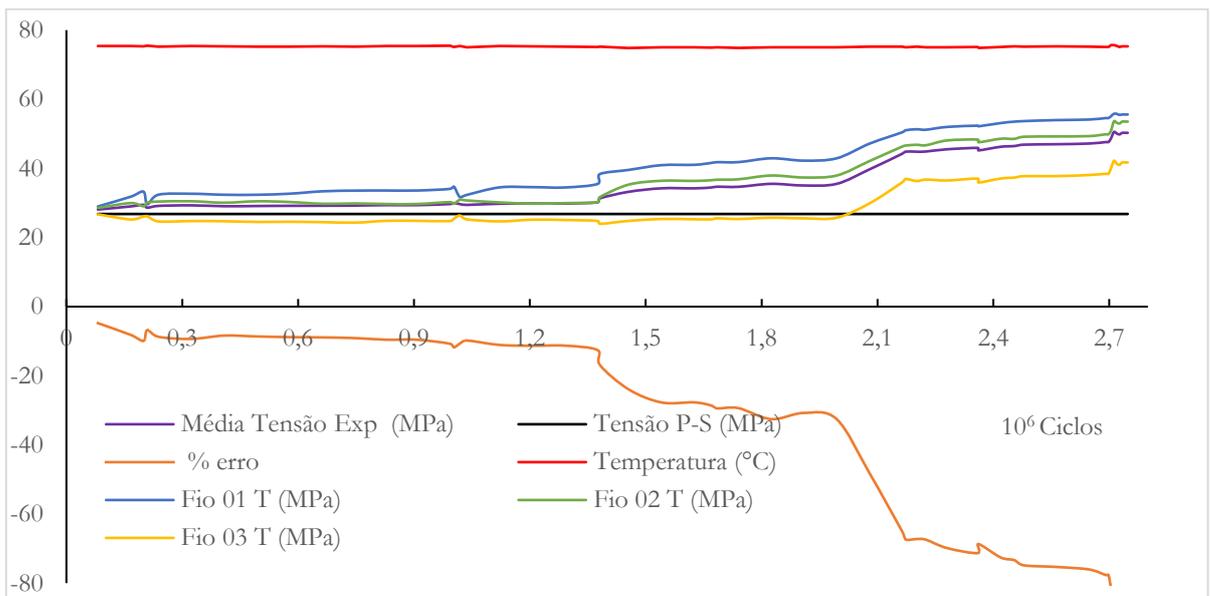


Figura C-6 – EN-09_A1_3/3_75°C, Tensão Experimental nos fios x P-S, durante o Ensaio

Os dados também foram utilizados para verificar o comportamento do ensaio para avaliar a margem de erro imposta, na correlação entre amplitude Y_b e tensão nominal calculada pela utilização da Fórmula de $P-S$ em função do tempo de ensaio, este comportamento pode ser visualizado na figura C-8. O erro se manteve dentro no nível aceitável para validação do ensaio, até as ocorrências das quebras simultâneas, após isto, ocorreu um aumento do erro substancialmente, chegando em quase oitenta por cento no final do ensaio. Também é possível verificar que em todo o ensaio a temperatura de 75°C se manteve constante.

ENSAIOS DA PRIMEIRA ETAPA (E1) GRUPO DE AMOSTRAS E1-A2- 75°C

Memorial de ensaio EN-07_A2_1/3_75°C_E1_CE03

O ensaio (EN 07) faz parte da segunda amplitude para compor a curva S-N, amplitude de 0,91 mm. A parte de fadiga foi executado sob temperatura de 75°C , nos dias 23 e 24 de setembro, com início às 01h59, horário que foi finalizado a instrumentação da amostra. A frequência natural de ensaio foi de 23,50 Hz. Neste, houve o monitoramento da temperatura com o termovisor, a temperatura era aferida no ponto de controle, diametralmente oposto ao UPC, juntamente com a periferia da cabine aquecida. A temperatura se manteve constante durante todo o processo, conforme detalhado no capítulo 4.0. Este monitoramento acontecia de seis em seis horas, e foram inspecionados alguns itens tais como: verificação das linhas de quebras externas, registros fotográficos e sonoros periodicamente de todo o decorrer do ensaio. Também houve o monitoramento automático da temperatura usando um aquisitor de dados.

Foi utilizado para coleta de dados dois aquisitores de sinais ADS1800, um para os sinais oriundos dos lasers indicadores de rotação do cabo, que registrava as quebras. O outro foi ligado o termopar tipo J, para monitorar a temperatura durante o ensaio, juntamente os sinais dos seis extensômetros que foram colados nos fios externos, sendo três no topo adjacente ao UPC e três na base do CE. Neste ensaio, houve apenas o monitoramento contínuo com o laser no ponto 89 mm, o sinal corroborou com o registro das oito quebras identificadas pelos extensômetros. A temperatura se manteve constante durante todo o ensaio.

Deste modo, a figura C-10 mostra os resultados para o desvio padrão das deformações nos fios. Ao todo foram $2,780 \cdot 10^6$ ciclos para o ensaio 07. Pelo quadro C-9 é possível verificar o resumo das estatísticas do EN-07, teve uma quantia de dois milhões e setecentos e noventa mil ciclos, três quebras externas e cinco quebras internas. É notório que em aproximadamente

setecentos e cinquenta mil ciclos houve uma perturbação nos sinais de todos os extensômetros, o que indica a primeira quebra interna. Neste ensaio houve oito quebras, sendo as quebras externas identificadas mais facilmente. O quadro C-10 apresenta os resultados para as quebras externas, e a distância que cada fio se rompeu, assim como a quantidade de ciclo para cada uma. É possível visualizar que neste ensaio houve duas quebras simultaneamente, este registro é mais perceptível com o uso dos extensômetros colados também na base do CE. O fio 10 foi o primeiro fio externo a se romper, foi verificado pela inspeção visual realizada durante os ensaios, entretanto neste ensaio não tinha extensômetro colado, não sendo possível fazer o registro da quebra do fio 10 no gráfico, entretanto pode-se perceber a perturbações dos demais sinais.

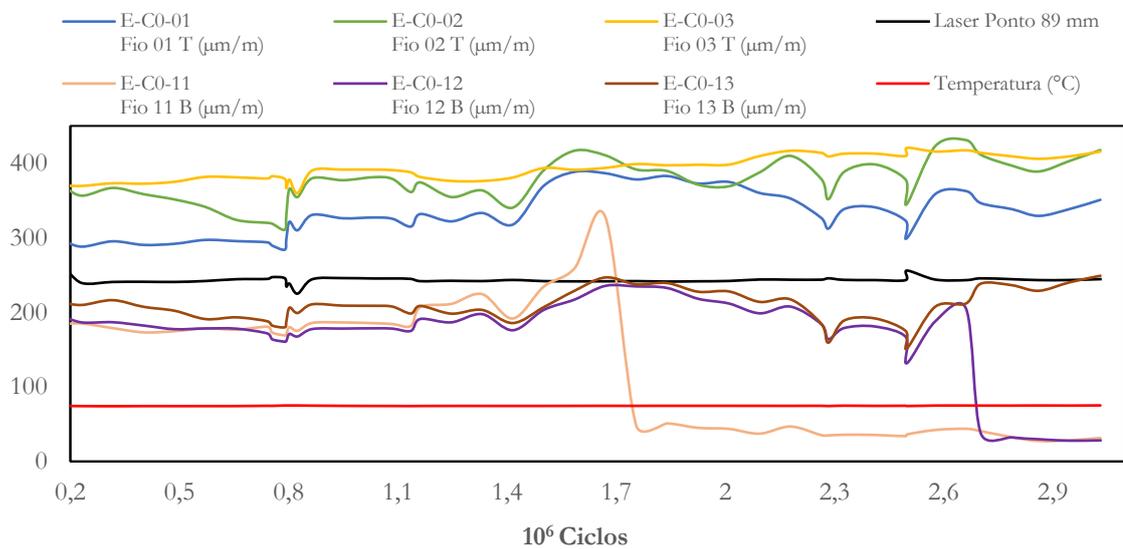


Figura C-10 – Detecção das quebras, EREs colados no CE, EN-07_A2_1/3_75°C.

Quadro C-10- – Resumo das quebras do EN-07_A2_1/3_75°C

EN-07 75°C	23/09/2018 24/09/2018	Yb 0,91	Nº [fio]	DMF [mm]								
8 Quebras 2,79E+06	externa	3	E-C0-10	(35,56) ^{B-V}	E-C0-11	(38,18) ^{B-45}	E-C0-12	(38,15) ^{B-V}				
	interna	5	I-C1-12	(38,77) ^{T-45}	I-C1-01	(24,03) ^{T-45}	I-C1-06	(32,32) ^{B-QP}	I-C1-07	(38,08) ^{B-45}	I-C1-08	(41,69) ^{B-QP}

Quadro C-81 – Identificação das quebras externas, EN-07_A2_1/3_75°C

EN-07	Fio	Fio	DMF [mm]	Ciclos	Ciclos 10 ⁶
4ª quebra	E-C0-10	10 ext. B	(32,89) ^{B-V}	1416124,4521	1,42E+06
5ª quebra	E-C0-11	11 ext. B	(35,20) ^{B-45}	1670298,6849	1,67E+06
8ª quebra	E-C0-12	12 ext. B	(34,92) ^{B-V}	2701932,7150	2,70E+06

Na medida em que as ocorrências das quebras evoluíram, tem-se a dificuldade em identificar com exatidão qual fio interno quebrou, porém foi possível identificar o evento da quebra interna. Sendo assim, o quadro C-111, traz a ordem das quebras identificadas e a quantidade de ciclos das ocorrências.

Quadro C-11 – Ordem das quebras e quantidade de ciclos N.

EN-07. Quebras	Ciclos	Ciclos
1ª quebra	793574,3678	7,94E+05
2ª quebra	1262209,29	9,50E+05
3ª quebra	1600474,69	1,16E+06
4ª quebra	1685077,04	1,42E+06
5ª quebra	1670298,6849	1,67E+06
6ª quebra	2178956,5522	2,18E+06
7ª quebra	2495529,3861	2,50E+06
8ª quebra	2701932,7150	2,70E+06

Foi monitorado também o comportamento da tensão média dos três fios de topo do CE, durante o ensaio. Assim, é possível verificar o comportamento da amplitude de deslocamento, traduzida em tensão média, dos extensômetros colados no topo do CE. A figura C-11 apresenta o comportamento da tensão experimental de cada fio ao longo do ensaio, e a tensão teórica de P-S. Apresentou erro maiores que 20%, logo após a validação do ensaio.

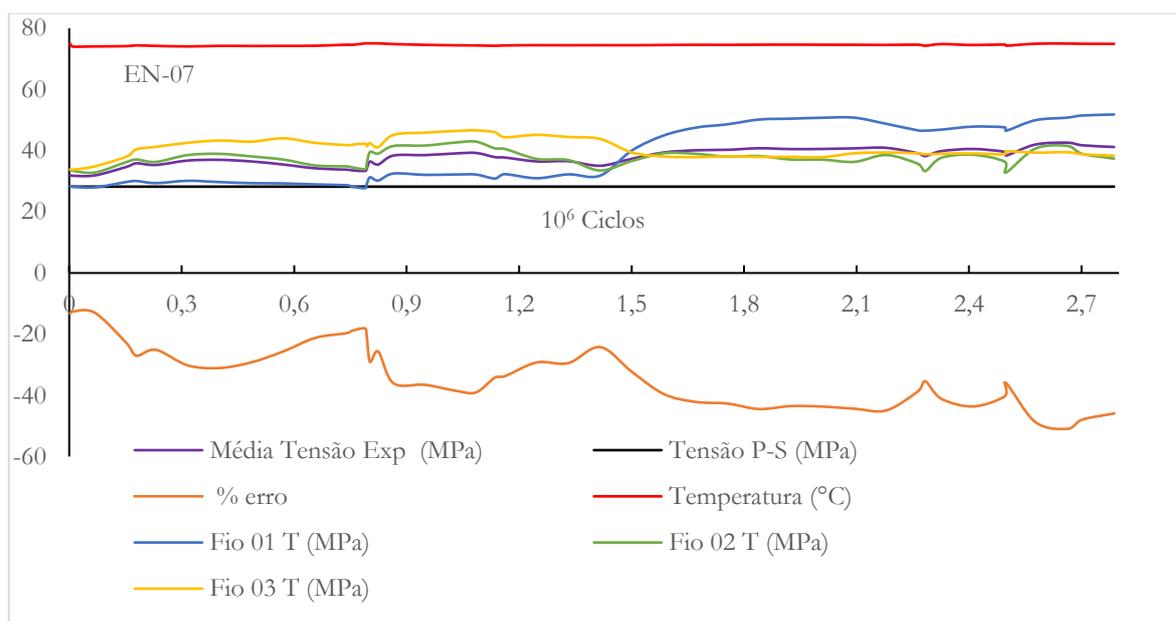


Figura C-11 – EN-07 A2 1/3 temp. 75°C. Tensão Experimental nos fios x P-S, durante o Ensaio

Memorial de ensaio EN-11_A2_2/3_75°C_E1_CE04

O ensaio 11 foi ensaiado com amplitude de $0,91\text{ mm}$, e teve início as 18h30 assim que foi finalizada a instrumentação da amostra e foi realizado nos dias 15 e 16 de outubro. A frequência natural de ensaio foi de $23,53\text{ Hz}$, e não mudou durante o processo, devido a estabilidade do ensaio. Houve o monitoramento e inspeção visual periodicamente de todo o CE, assim como as verificações das condições de ensaio, e foram inspecionados alguns itens tais como; verificação das linhas de quebras externas, registros fotográficos e sonoros de todo o decorrer do ensaio e monitoramento automático da temperatura. Para coletar os dados neste ensaio foi utilizado três aquisições de sinais, dois ADS1800 (8 canais), e um ADS 2000 que eram utilizados para fazer a redundância dos dados oriundos dos lasers, que detectava as quebras.

Foram utilizadas sete extensômetros, sendo três no topo oposto ao UPC e quatro na base, do CE, (ver figura 3.29), os dados eram coletados juntamente com o sinal de um termopar tipo J, (ver figura 3.34), para monitorar a temperatura durante o ensaio, usando assim todos os canais do aquisitor de dados. O terceiro aquisitor foi ligado aos lasers do sistema TFC.

É perceptível pelo gráfico da figura C-12, a detecção das quebras pela leitura dos extensômetros colados no CE que em aproximadamente seiscentos e doze mil ciclos houve uma perturbação nos sinais de todos os extensômetros, o que indica a primeira quebra interna foram seis quebras, sendo as quebras externas identificadas com mais clareza e facilidade e em tempo real.

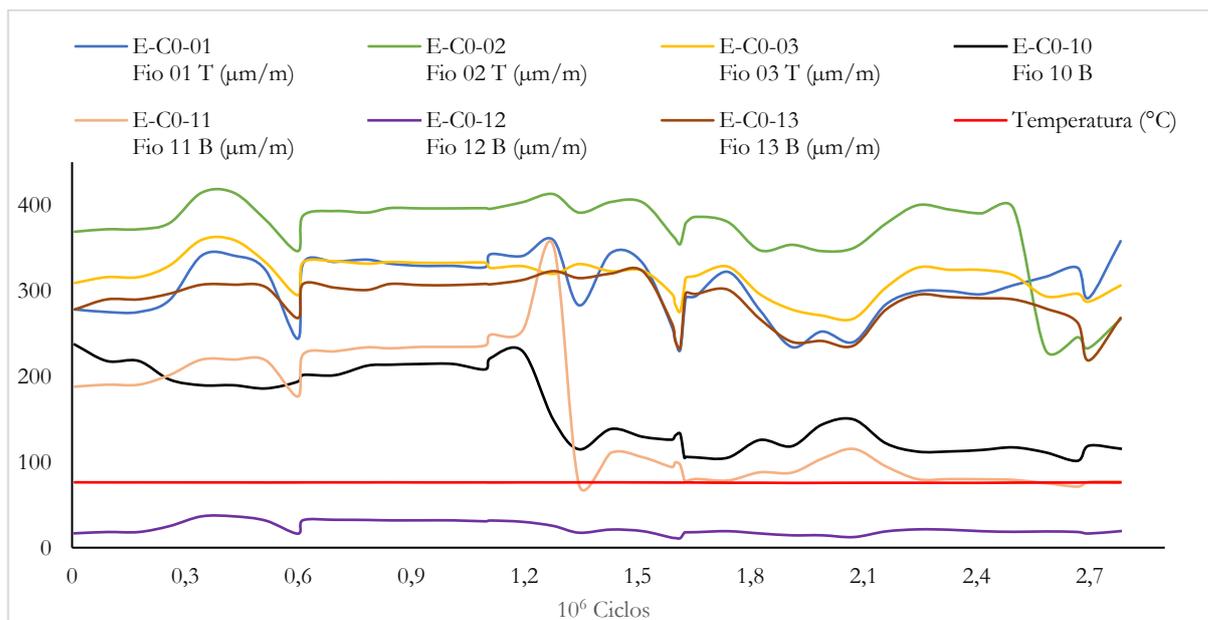


Figura C-12 – Detecção das quebras, EREs colados no CE, EN-11_A2_2/3_75°C

Os detalhes do resumo de ensaio e das quebras são mostrados no quadro C-12, que apresenta os resultados para as quebras e a distância média das falhas (DMF) que cada fio se rompeu, assim como a identificação de cada fio, apresenta a estatísticas final, teve uma quantia de dois milhões e setecentos mil ciclos, quatro quebras externas e três internas, o quadro C-13, traz a ordem das quebras identificada e a quantidade de ciclos das ocorrências, e o quadro C-14 apresenta os detalhes geral de cada quebras externas as quais foram identificadas em tempo real e anotado no memorial de ensaio, após o processamentos dos sinais foram confirmados através dos gráficos conforme mostrado anteriormente.

Quadro C-12 – Resumo de ensaio e das quebras do EN-11_A2 2/3 75°C

EN-11 75°C	15/10/2018 16/10/2018	YB 0,91	Nº [fio]	DMF [mm]	Nº [fio]	DMF [mm]	Nº [fio]	DMF [mm]	Nº [fio]	DMF [mm]
6 Quebras 2,79E+06	externa	2	E-C0-10	(37,41) ^{B-QP}	E-C0-11	(37,09) ^{B-L}				
	interna	4	I-C1-12	(31,19) ^{T-45}	I-C1-01	(37,64) ^{T-45}	I-C1-06	(24,49) ^{B-45}	I-C1-07	(32,85) ^{B-L}

Deste modo, através dos sinais dos extensômetros e de suas deformações nos fios foi monitorado o comportamento da tensão média dos três fios de topo do CE, durante o processo, assim, foi possível verificar o comportamento da amplitude de deslocamento, traduzida em tensão média, a figura C-14 apresenta o comportamento da tensão experimental de cada fio ao longo do ensaio, e a tensão teórica de P-S. É observável que após os primeiros duzentos mil ciclos apresentou erro maiores que 20%, logo após a validação do ensaio. Estes sinais também permitem a contagem exata da quantidade de ciclos N, ao todo foram aproximadamente dois milhões setecentos e noventa mil ciclos.

Quadro C-13 – Ordem das quebras e quantidade de ciclos N. EN-11_A2 2/3 75°C.

EN-11. Quebras	Ciclos	Ciclos
1ª quebra	612901,5137	6,13E+05
2ª quebra	1276956,3856	1,28E+06
3ª quebra	1345770,5954	1,35E+06
4ª quebra	1825153,8080	1,83E+06
5ª quebra	2159285,1442	2,16E+06
6ª quebra	2583217,9531	2,58E+06

Quadro C-14 – Resumo das quebras externas. EN-11_A2 2/3 75°C.

EN-11	Fio	Fio	DMF [mm]	Ciclos	Ciclos 10 ⁶
2ª quebra	E-C0-10	10 ext. B	(37,41) ^{B-QP}	1276956,3856	1,28E+06
3ª quebra	E-C0-11	11 ext. B	(34,40) ^{B-L}	1345770,5954	1,35E+06

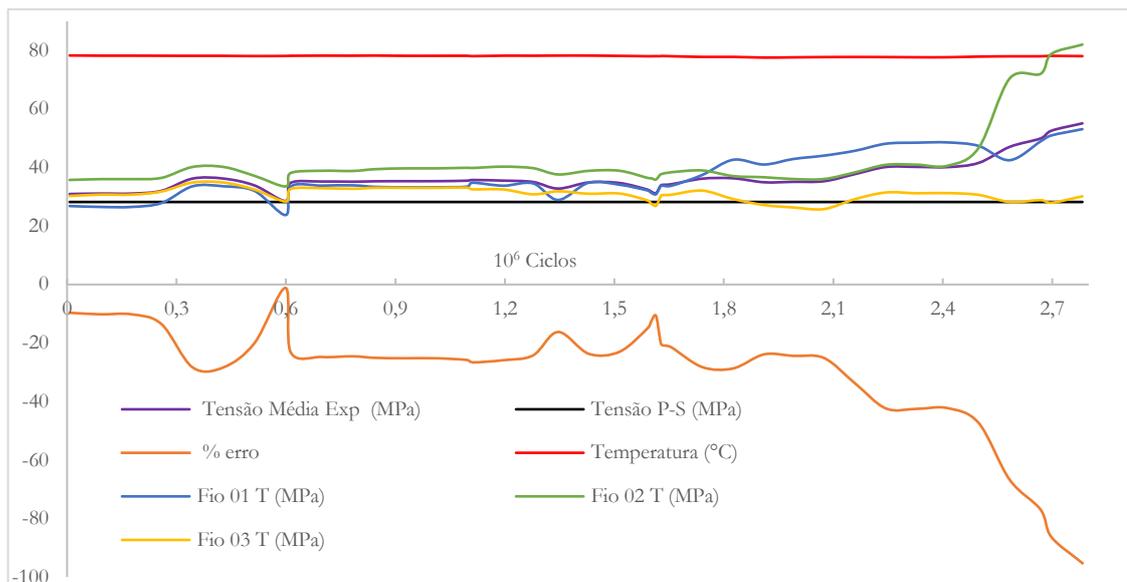


Figura C-14 – Tensão Experimental nos fios x P-S, durante o EN-11_A2_2/3_75°C.

Memorial de ensaio EN-03-A2-3/3-75°C-E1-CE-01

No EN-03, sendo a segunda amplitude ensaiada, para compor a curva $S - N$, foi executado o ensaio de fadiga e temperatura nos dias 07, 08 e 09 de agosto, com início às 02h11, horário que foi finalizado a instrumentação da amostra. Após o início o monitoramento foi realizado de 6 em 6 horas, e foram inspecionados alguns itens; como fotos da condição térmica de temperatura no último ponto de contato do cabo/grampo, e periférico da amostra. As linhas de quebras externas, foram fotografadas a cada inspeção, assim como os registros periódicos ocorreu em todo o decorrer do ensaio. Também houve monitoração digital, foi realizado a aquisição de dados dos lasers indicadores de amplitudes e rotação do cabo, o que indica quebras. Além disso, foram utilizados os três extensômetros que são colados no topo CE, estes dados foram coletados durante o ensaio, além de fazer a validação do ensaio pela fórmula de P-S, estes extensômetros foram utilizados para detecção das quebras dos fios. A frequência natural de ensaio inicial foi de 19,10 Hz, apresentando pequena diferença a cada varredura.

As temperaturas aferidas com o termovisor, conforme descrito na seção 4.38, corroboram com as temperaturas medidas com o termopar registradas durante a execução do ensaio.

Neste ensaio, algumas ocorrências foram registradas e anotados na ficha de ensaio. A mesa do shake rompeu, durante a execução, em aproximadamente 1588591 ciclos, o ensaio foi interrompido. Após a confecção de uma nova mesa, o ensaio foi retomado. Ao final do ensaio o programa TFC indicava dois milhões e setecentos mil ciclos rodados, entretanto, ao montar a planilha e fazer os cálculos, foi constatado que o ensaio rodou três milhões de ciclos.

Devido ao uso apenas de três extensômetros, as quebras dos fios da base foram identificadas por inspeção. O extensômetro do fio 02, danificou logo após a validação do ensaio, ficando apenas dois extensômetros de topo, para auxiliar na identificação das quebras. O resumo das estatísticas é apresentado no quadro C-15. As quebras externas dos fios 09, 10, 11, não foram registrados nos sinais dos extensômetros, pois neste, só foram colados os extensômetros de topo, sendo assim, a única quebra externa registrada com precisão foi a nona quebra, com 2683965,223 ciclos conforme mostra no quadro C-16, e pode ser observado no gráfico da figura C-15, o momento que o sinal do fio 01 do topo, muda abruptamente indicando quebras internas e quase no final do ensaio indica finalmente o seu rompimento. É possível observar que o sinal captado pelo laser no ponto 89 mm acompanham a movimentação identificada pelos sinais dos extensômetros, o sinal em preto não reproduz a amplitude real de ensaio, o sinal foi ampliado em 10^3 para observar a movimentação do CE durante as quebras.

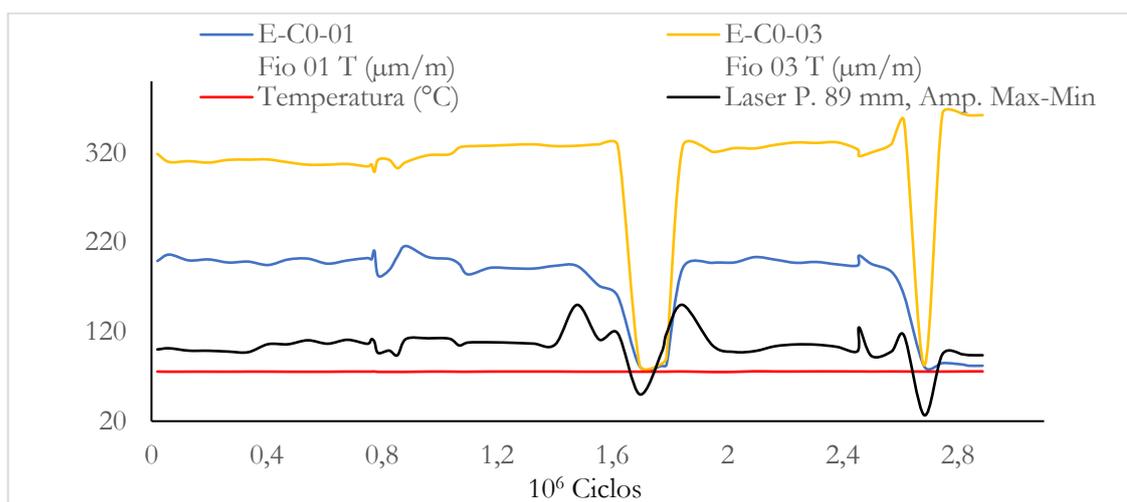


Figura C-15 – Detecção das quebras, EREs colados no CE, EN-03_A2_3/3_75°C

Quadro C-15 – Resumo de ensaio e das quebras do EN-03_A2_3/3_75°C

EN-03 75°C	09/08/2018 10/08/2018	Yb 0,91	Nº [fio]	DMF [mm]	Nº [fio]	DMF [mm]	Nº [fio]	DMF [mm]	Nº [fio]	DMF [mm]
10 Quebras $3,05E+06$	Externa	4	E-C0-01	(44,22) ^{T-QP}	E-C0-09	(37,31) ^{B-L}	E-C0-10	(35,89) ^{B-45}	E-C0-11	(31,70) ^{B-V}
	Interna	4	I-C1-11	(46,12) ^{T-L}	I-C1-12	(36,96) ^{T-45}	I-C1-01	(42,33) ^{T-45}	I-C1-05	(27,62) ^{B-V}
	Externa	0								
	Interna	2	I-C1-06	(33,84) ^{B-L}	I-C1-07	(29,86) ^{B-V}				

Desta forma todas as quebras são apresentadas no quadro C-17 juntamente é apresenta a ordem de todas as quebras e quantidade de ciclos em que as elas foram identificadas usando vários dispositivos de identificação para o EN-03_A2_3/3_75°C, conforme mencionado anteriormente e apresentado na figura C-16 que foram os sinais captados pelos lasers, estes

sinais não traduzem o valor real de ângulo e amplitude, pois passaram por amplificação de modo a traduzir o movimento e ajudar na identificação da ruptura dos fios na amostra.

Quadro C-16 – Identificação das quebras externas. EN-03_A2 3/3_75°C

EN-03 Quebras	Fio	Fio	DMF [mm]	Ciclos	Ciclos 10 ⁶
1ª quebra	E-C0-09	09 ext. B	(33,63) ^{B-L}	786868,8184	7,87E+05
5ª quebra	E-C0-10	10 ext. B	(33,11) ^{B-45}	1695155,772	1,70E+06
6ª quebra	E-C0-11	10 ext. B	(28,58) ^{B-V}	1844672,817	1,84E+06
9ª quebra	E-C0-01	01 ext. T	(42,27) ^{T-QP}	2683965,223	2,68E+06

Quadro C-17 – Ordem das quebras e quantidade de ciclos N. EN-03_A2 3/3_75°C

EN- 03 Quebras	Ciclos	Ciclos
1ª quebra E	786868,8184	7,87E+05
2ª quebra I	1099483,69	1,10E+06
3ª quebra I	1554315,564	1,55E+06
4ª quebra I	1618867,394	1,62E+06
5ª quebra E	1695155,772	1,70E+06
6ª quebra E	1844672,817	1,84E+06
7ª quebra I	2457110,893	2,46E+06
8ª quebra I	2499848,851	2,50E+06
9ª quebra I	2683965,223	2,68E+06
10ª quebra I	3051656,704	3,05E+06

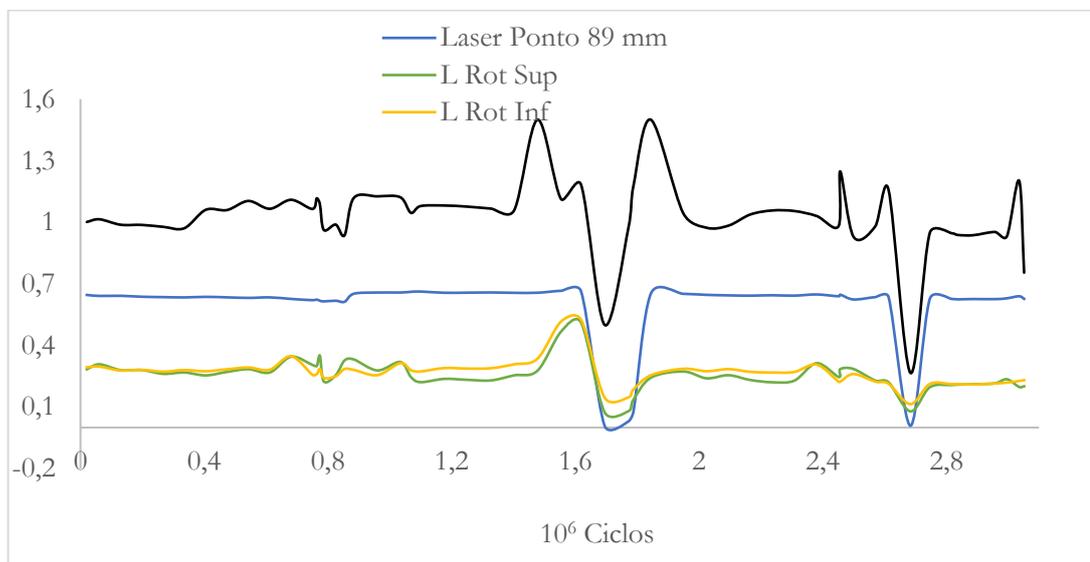


Figura C-16 – Detecção das quebras, a partir dos sinais captados pelos lasers EN-03_A2 3/3_75°C

Foi monitorado também o comportamento da tensão média apenas nos dois fios de topo do CE, extensômetro fio 2 danificou se após a validação do ensaio, e durante o ensaio só foi

registrado dois sinais. Mesmo assim foi possível verificar o comportamento da amplitude de deslocamento, traduzida em tensão média. A figura C-17 apresenta o comportamento da tensão experimental para os dois fios ao longo do ensaio, e a tensão teórica de $P-S$.

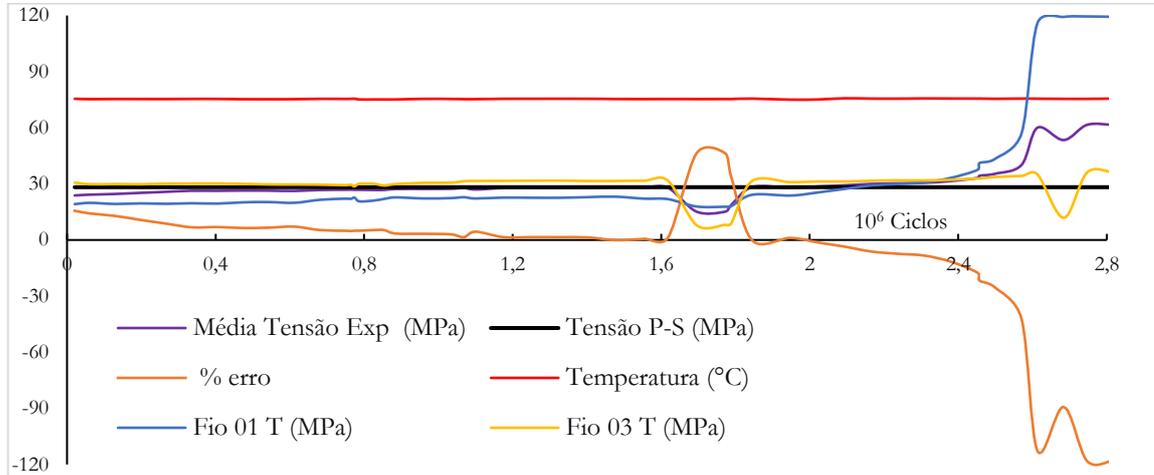


Figura C-17– EN-03 A2- 3/3_75°C. Tensão Experimental nos fios x P-S, durante o Ensaio

ENSAIOS DA PRIMEIRA ETAPA (E1) GRUPO DE AMOSTRAS E1-A3-75°C

Memorial de ensaio EN-04_A3_1/3_75°C_CE-02_E1

O ensaio 04 (EN 04) foi a primeira estatística com amplitude de 1,01 mm, foi executado o ensaio de fadiga sob temperatura nos dias 25 e 26 de agosto, com início às 14h00, horário que foi finalizado a instrumentação da amostra. Após o início o monitoramento foi realizado de 6 em 6 horas, e foram inspecionados alguns itens; como fotos da condição térmica de temperatura no último ponto de contato do cabo/grampo, e periférico da amostra, verificação das linhas de quebras externas e registros fotográficos de todo o decorrer do ensaio. Aquisição de dados dos lasers indicadores de amplitudes e rotação do cabo, o que indica quebras, dos três extensômetros colados no topo do cabo. A frequência natural de ensaio inicial foi de 16,92 Hz, apresentando pequena diferença a cada varredura.

Neste ensaio, não foram usados os lasers da régua para coletar os sinais redundantes, houve uma solicitação de uso para eles. Assim, houve apenas o monitoramento para o sistema TFC. Entretanto, foram usados os três extensômetros colados no topo do CE, além de fazer a verificação da tensão média de ensaio pela fórmula de $P-S$, estes extensômetros foram utilizados para detecção das quebras dos fios. As temperaturas aferidas com o termovisor, conforme relatadas no capítulo 4, corroboram com as temperaturas medidas durante a execução

do ensaio. A primeira quebra aconteceu internamente, e pode ser confirmada em vários gráficos gerados a partir dos sinais captados, e aponta ter ocorrido aos quatrocentos e oitenta mil ciclos, logo na sequência acontece a segunda quebra, com quinhentos e quarenta e sete mil ciclos.

O gráfico da figura C-18, apresenta de forma evidente a ocorrências das primeiras quebras. Estes registros só foram possíveis devido ao uso de extensômetros para a detecção das quebras, apesar do laser ter sinalizado o primeiro evento de forma expressiva, (o sinal do laser não representa a unidade real da amplitude, foi ampliado 10^3).

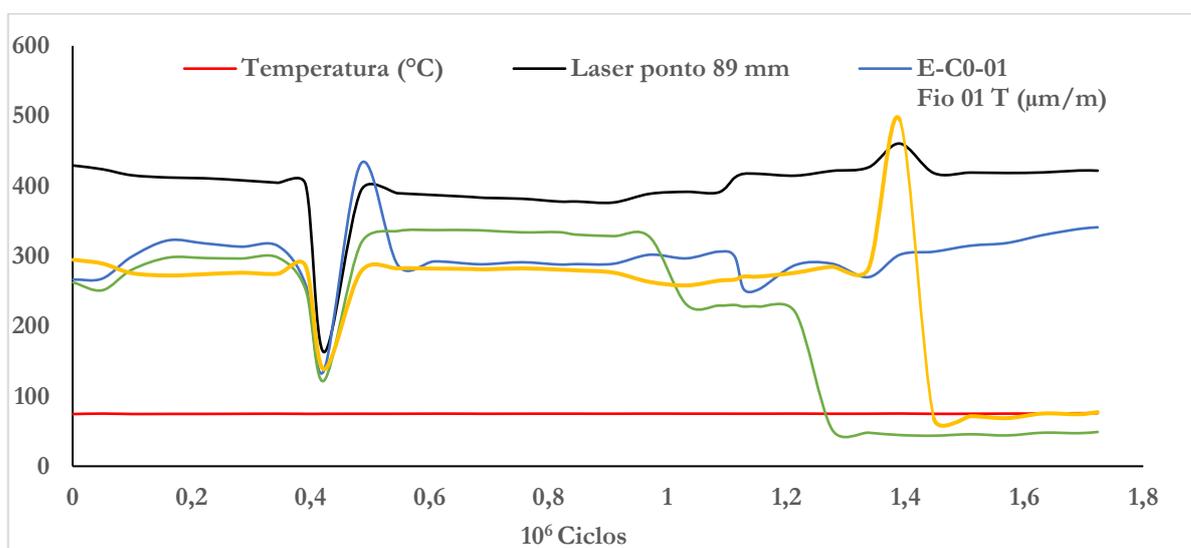


Figura C-18– Detecção das quebras, EREs colados no CE e laser no ponto 89mm, EN-04_A3_1/3_75°C.

O quadro C-18 apresenta o resumo das quebras, e a posição da quebra em relação a borda do grampo. Embora neste ensaio tenha ocorridos doze quebras, não foi possível fazer a identificação de todas elas, sendo assim o quadro C-19 apresenta as oito quebras identificadas no ensaio.

Como neste ensaio não teve extensômetros colados nos fios externos da base, não foi possível precisar a identificação de cada fio relacionados a quantidade de ciclos, porém os fios de topo, as quebras aconteceram no fio 02 com 1322802,68 ciclos e no fio 03 com 1494065,86 ciclos. Houve também uma quebra na terceira camada, como só houve extensômetros no topo, as quebras da base dos fios externos não foram registradas devido a isso. O quadro C-19 apresenta as características das quebras externas do topo. A foto da figura C-20 apresenta todas as quebras que ocorreram neste ensaio.

Quadro C-18 – Resumo de ensaio e das quebras do EN-04_A3 1/3_75°C

EN-04 75°C	25/08/2018 26/08/2018	Yb 1,01	Nº [fio]	DMF [mm]	Nº [fio]	DMF [mm]	Nº [fio]	DMF [mm]	Nº [fio]	DMF [mm]
12 Quebras 1,77E+06	externa	4	E-C0-02	(42,93) ^{T-V}	E-C0-03	(44,19) ^{T-45}	E-C0-10	(34,23) ^{B-QP}	E-C0-11	(34,98) ^{B-L}
	interna	4	I-C1-11	(38,23) ^{T-45}	I-C1-12	(34,29) ^{T-45}	I-C1-03	(33,85) ^{T-45}	I-C1-02	(37,01) ^{T-45}
	externa	1	E-C0-12	(32,90) ^{B-QP}						
	interna	3	I-C1-01	(33,22) ^{T-45}	I-C1-08	(30,67) ^{B-L}	I-C1-07	(33,91) ^{B-V}		

Quadro C-19 – Ordem das quebras e quantidade de ciclos N. EN-04_A3 1/3_75°C

EN-04. Quebras	Ciclos	Ciclos
1ª quebra	484495,819	4,84E+05
2ª quebra	546920,384	5,47E+05
3ª quebra	1062032,458	1,06E+06
4ª quebra	1200196,328	1,20E+06
5ª quebra	1322802,680	1,32E+06
6ª quebra	1494065,859	1,49E+06
7ª quebra	1616539,270	1,62E+06
8ª quebra	1769275,559	1,77E+06



Figura C-19 – Foto das quebras EN-04_A3 1/3_75°C

Quadro C-20 – Quebras Externas de topo (as falhas da base, não foi possível identificar).

EN-04. Quebras	Fio	Fio	DMF [mm]	Ciclos	Ciclos 10 ⁶
5ª quebra	E-C0-02	02 ext. T	(41,03) ^{T-V}	1322802,68	1,32E+06
6ª quebra	E-C0-03	03 ext. T	(39,31) ^{T-45}	1494065,86	1,49E+06

Foi monitorado o comportamento da tensão média dos fios de topo do CE, pode-se perceber que, após a primeira quebra a tensão média aumentou de forma abrupta em todos os fios de

topo, o que pode ser indício da quebra do fio da C2 no mesmo momento. Entretanto, é apenas uma hipótese, haja vista, que o comportamento das quebras internas é mais difícil de se identificar, necessitando de mais estudos para estabelecer um padrão para os sinais a fim de identificar cada fio e quantidade de ciclos do evento. A figura C-20 apresenta o comportamento da tensão experimental ao longo do ensaio, e a tensão teórica de $P-S$.

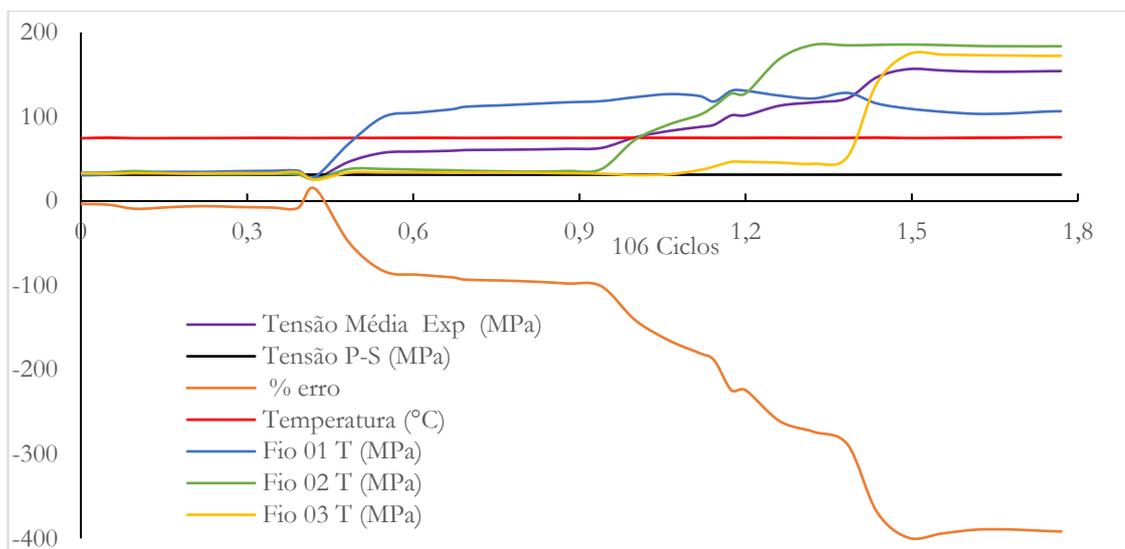


Figura C-20– EN-04_A3_1/3_75°C Tensão experimental nos fios x P-S durante o Ensaio

Memorial de ensaio EN-08_A3_2/3_75°C_CE03_E1

O ensaio EN-08 constituiu-se a amostra 2/3, e foi a segunda estatística para constituir o terceiro ponto da curva S-N, sendo a terceira amplitude ensaiada. Foi executado o ensaio de fadiga sob temperatura nos dias 27 e 28 de agosto, com início às 19h00, horário que foi finalizado a instrumentação da amostra.

Após o início do ensaio o monitoramento foi realizado periodicamente, e foram inspecionados alguns itens, e periférico da amostra. As linhas de quebras externas, foram fotografadas a cada inspeção, assim como a inspeção visual ocorreram em todo o decorrer do ensaio. Também houve monitoração digital, foi realizado a aquisição de dados dos lasers indicadores de amplitudes e rotação do cabo, dispositivo que registra as quebras, (TFC). Além disso, foram utilizados os três extensômetros que são colados no topo do CE, diametralmente oposto ao UPC, estes dados foram coletados durante o ensaio, além de fazer a validação do ensaio pela fórmula de $P-S$, estes extensômetros foram utilizados para detecção das quebras dos fios e verificação da tensão média em função do tempo. A frequência natural de ensaio inicial foi de 23,53 Hz, apresentando pequena diferença a cada varredura. As temperaturas

aferidas com o termovisor, durante a execução do ensaio corroboram com as temperaturas registrada pelo termopar. Embora os sinais captados (figura C-21) pelos extensômetros apresentaram ruídos, uma possível causa pode ser a troca do driver dos aquisitores e ajuste para o uso do software *AqDados* para registros dos sinais. Entretanto, não inviabilizou a identificação das quebras, que foram confirmadas pelos sinais do TFC. O quadro C-21 apresenta o resumo das quebras identificadas após os processamentos dos sinais. O quadro C-22 apresenta ordem das quebras e quantidade de ciclos de cada evento e o quadro C-23 apresenta os detalhes dos fios externos rompidos e a quantidade de ciclos.

A temperatura de 75°C foi monitorada e se manteve constante, juntamente houve o monitoramento da amplitude do sinal no ponto 89mm, o sinal do laser não representa a unidade real da amplitude, devido a ampliação do sinal 10² para ampliar a movimentação do CE durante a ocorrência das quebras (figura C-22). Vale ressaltar que estes movimentos embora pareçam altos, constitui-se em movimentações milimétricas, entretanto pode ser uma boa estratégia para ajudar a identificar as quebras internas e externas no momento de cada ocorrência, e em tempo real. Lembrando que houve a atualização dos driver dos aquisitores e ajustes no software *AqDados*.

Quadro C-21 – Resumo de ensaio e das quebras do EN-08_A3 2/3 75°C

EN-08 75°C	27/09/2018 29/09/2018	Yb 1,01	Nº [fio]	DMF [mm]								
7 Quebras 1,92E+06	externa	2	E-C0-10	(36,91) ^{B-L}	E-C0-11	(37,66) ^{B-L}	-	-	-	-	-	-
	interna	5	I-C1-11	(45,42) ^{T-45}	I-C1-12	(42,49) ^{T-45}	I-C1-01	(44,70) ^{T-45}	I-C1-02	(36,43) ^{T-45}	I-C2-01	(36,43) ^{B-45}

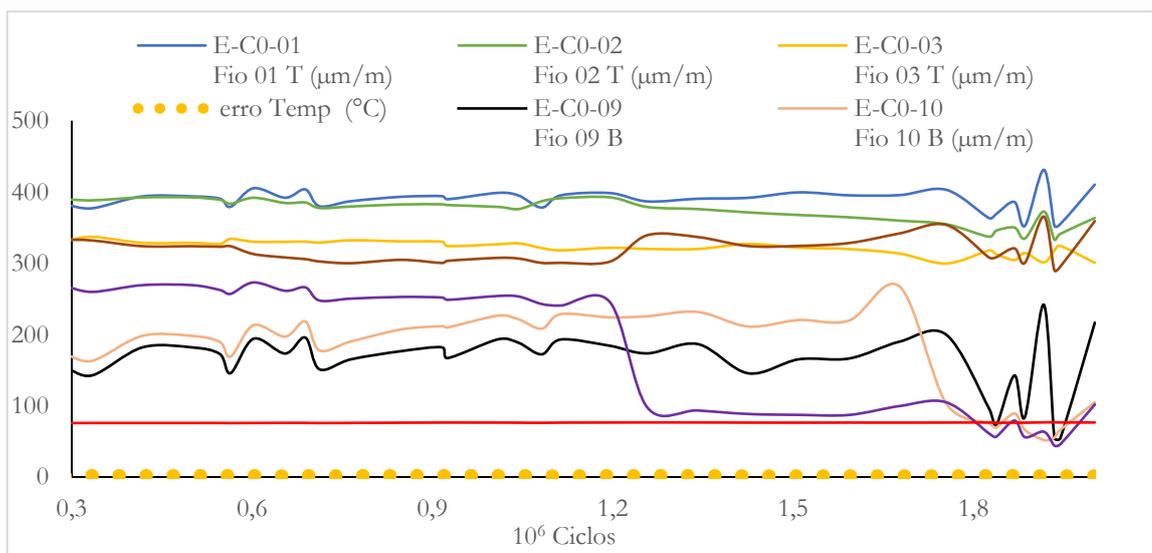


Figura C-21 – Detecção das quebras, EREs colados no CE, EN-08_A3 2/3 75°C

Quadro C-22 – Ordem das quebras e quantidade de ciclos N. EN-08_A3 2/3_75°C

EN-08. Quebras	Ciclos	Ciclos
1ª quebra I	614063,31	6,14E+05
2ª quebra I	779836,49	7,80E+05
3ª quebra I	925570,9128	9,26E+05
4ª quebra E	1257567,9632	1,26E+06
5ª quebra I	1404822,7456	1,40E+06
6ª quebra E	1825204,8088	1,83E+06
7ª quebra I	1987435,9792	1,99E+06

Quadro C-3 – Quebras externas de topo.

EN-08 Quebras	Fio	Fio	DMF (mm)	Ciclos	Ciclos 10 ⁶
4ª quebra	E-C0-10	10 ext. B	(33,35) ^{B-L}	1257567,9632	1,26E+06
6ª quebra	E-C0-11	11 ext. B	(34,06) ^{B-L}	1825204,8088	1,83E+06

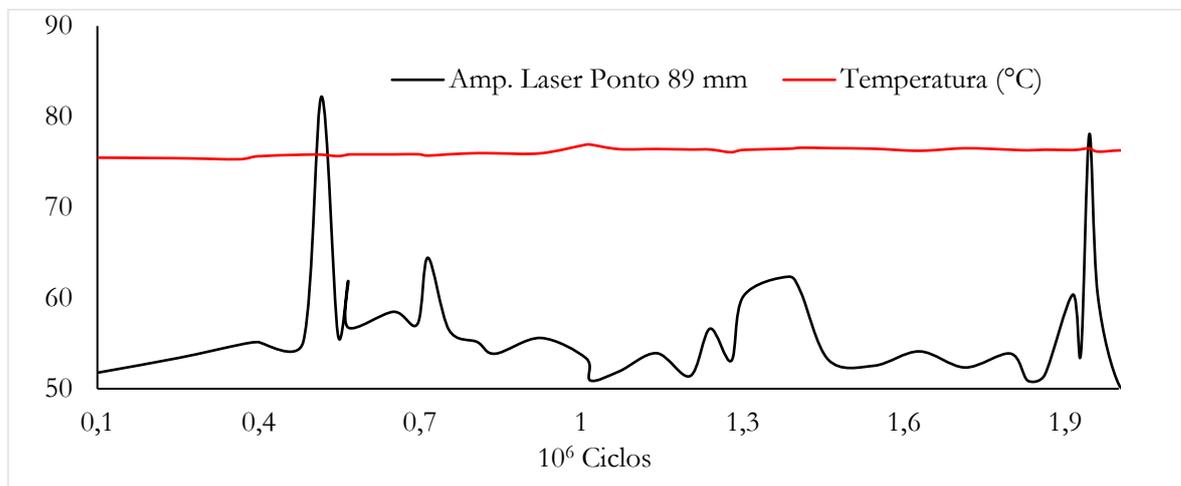


Figura C-22 – EN-08 A3 2/3_75°C sinal do laser, e temperatura de 75°C

É possível acompanhar a evolução da tensão média experimental $P-S$ nos fios de topo durante o ensaio. Os dados foram utilizados para verificar o comportamento e avaliar a margem de erro imposta, na correlação entre amplitude Y_b e tensão nominal calculada pela utilização da fórmula de $P-S$ em função do tempo de ensaio, este comportamento pode ser visualizado na figura C-23. O erro se manteve dentro no nível aceitável para validação do ensaio durante a primeira hora de ensaio, havendo uma aumento até as ocorrências das primeiras quebras, após isto, o erro cresceu de forma abrupta, chegando em quase oitenta por cento no final do ensaio. A foto da figura C-24 apresenta os sete fios que quebraram durante o ensaio.

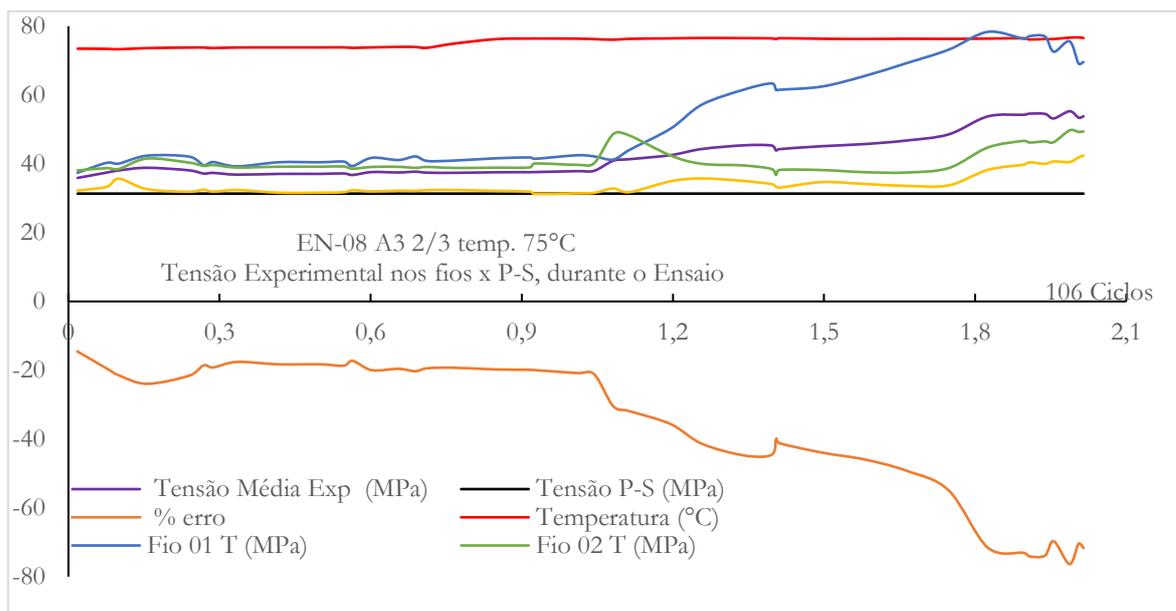


Figura C-23 – EN-08_A3_2/3_75°C . Tensão experimental nos fios x P-S durante o Ensaio

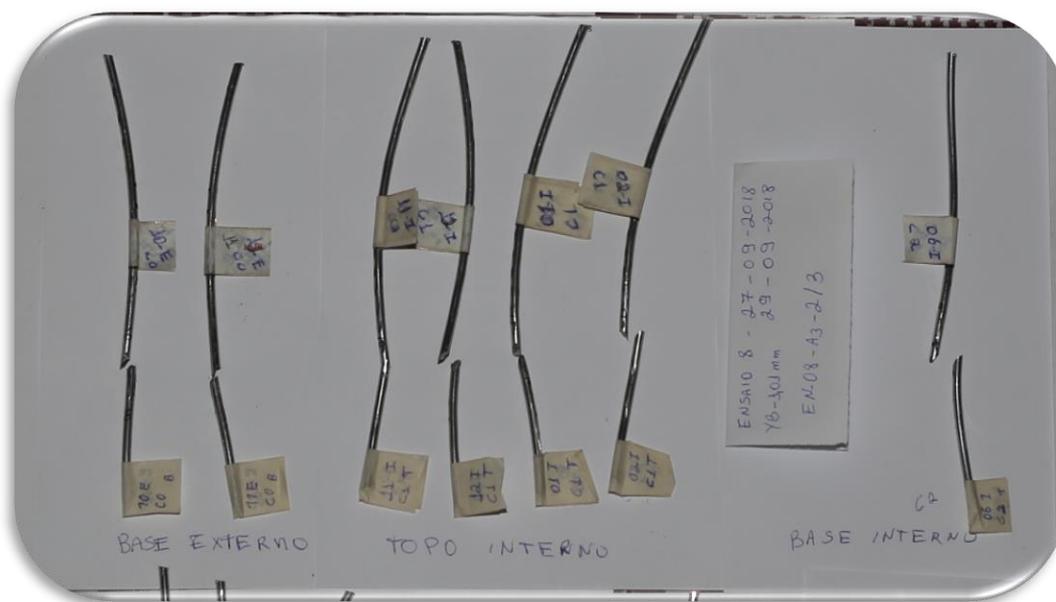


Figura C-24 – Foto das quebras do EN-04_A3_1/3_75°C

Memorial de ensaio EN-06_A3_3/3_75°C_CE-02_E1

O (EN 06) constitui-se no terceiro ponto da curva S-N, com amplitude de 1,01 mm a ser ensaiada, foi executado o ensaio de fadiga e temperatura nos dias 09 de setembro, com início às 00h00, horário que foi finalizado a instrumentação da amostra. Após o início do ensaio o monitoramento foi realizado de 6 em 6 horas, e foram inspecionados alguns itens; como fotos da condição térmica de temperatura no último ponto de contato do cabo/grampo, e periférico

da amostra. As linhas de quebras externas, foram fotografadas a cada inspeção, estes registros periódicos ocorreram em todo o decorrer do ensaio. Esta amostra foi instrumentada com 6 extensômetros, três no topo e três na base. Também houve monitoração digital, com a aquisição de dados dos lasers indicadores de amplitude no ponto 89 mm e rotação do cabo, usando o TFC. Além disso, foram utilizados os três extensômetros que são colados no topo CE, estes dados foram coletados durante o ensaio, além de fazer a validação do ensaio pela fórmula de $P-S$, estes extensômetros foram utilizados para detecção das quebras dos fios. A frequência natural de ensaio inicial foi de $19,10\text{ Hz}$, apresentando pequena diferença a cada varredura.

As temperaturas aferidas com o termovisor, conforme descrito no capítulo 3, corroboram com as temperaturas medidas com o termopar e coletadas com aquisitor de dados durante a execução do ensaio. A figura C-25 apresenta os sinais captados dos extensômetros e termopar onde todas as quebras foram identificadas e a quantidade de ciclos N correspondentes, o quadro C-24 apresenta o resumo dos fios rompidos. Neste ensaio fio 10, não havia extensômetro colado, entretanto pela inspeção visual, parece ter rompido próximo a quantidade de ciclos do fio 11. A ordem das quebras e a quantidade de ciclos das falhas aparecem nos quadro C-25 e o C-26 26 A foto da figura C-26 apresenta os sete fios que quebraram.

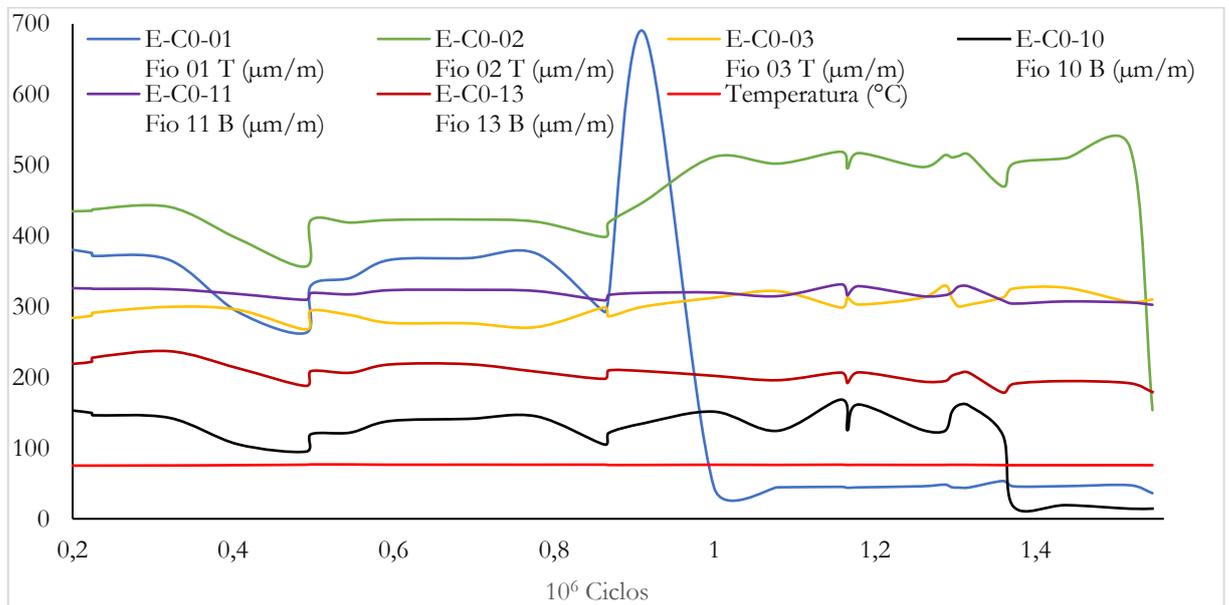


Figura C-25 – Detecção das quebras, EREs colados no CE, EN-06_A3_3/3_75°C

Quadro C-24 – Resumo de ensaio e das quebras do EN-06 A3 3/3-75°C

EN-06 75°C	09/09/2018 10/09/2018	Yb 1,01	Nº [fio]	DMF ^F [mm]	Nº [fio]	DMF [mm]	Nº [fio]	DMF [mm]	Nº [fio]	DMF [mm]
8 Quebras $1,54E+06$	externa	4	E-C0-01	(45,35) ^{T-45}	E-C0-02	(48,26) ^{T-45}	E-C0-10	(34,77) ^{B-V}	E-C0-11	(32,24) ^{B-V}
	interna	4	I-C1-12	(31,82) ^{T-45}	I-C1-01	(41,88) ^{T-45}	I-C1-06	(37,26) ^{B-45}	I-C1-07	(30,14) ^{B-L}

Quadro C-25 – Ordem das quebras e quantidade de ciclos N. EN-06 A₃ 3/3-75°C

EN-06 Quebras	Ciclos	Ciclos 10 ⁶
1 ^a quebra I	595349,3116	5,95E+05
2 ^a quebra I	863006,5214	8,63E+05
3 ^a quebra I	999285,2593	9,99E+05
4 ^a quebra E	1165575,601	1,17E+06
5 ^a quebra I	1316452,956	1,32E+06
6 ^a quebra E	1372511,89	1,37E+06
7 ^a quebra E	1372511,89	1,37E+06
8 ^a quebra E	1545750,555	1,55E+06

Quadro C-26 – Quebras de ensaio e externas de topo e base

EN-06 Quebras	Fio	Fio	DMF (mm)	Ciclos	Ciclos 10 ⁶
4 ^a quebra	E-C0-01	01 ext. T	(45,35) ^{T-45}	1165575,601	1,17E+06
6 ^a quebra ⁴	E-C0-10	10 ext. B	(29,94) ^{B-V}	1372511,89	1,37E+06
7 ^a quebra	E-C0-11	11 ext. B	(29,94) ^{B-V}	1372511,89	1,37E+06
8 ^a quebra	E-C0-02	01 ext. T	(46,31) ^{T-45}	1545750,555	1,55E+06

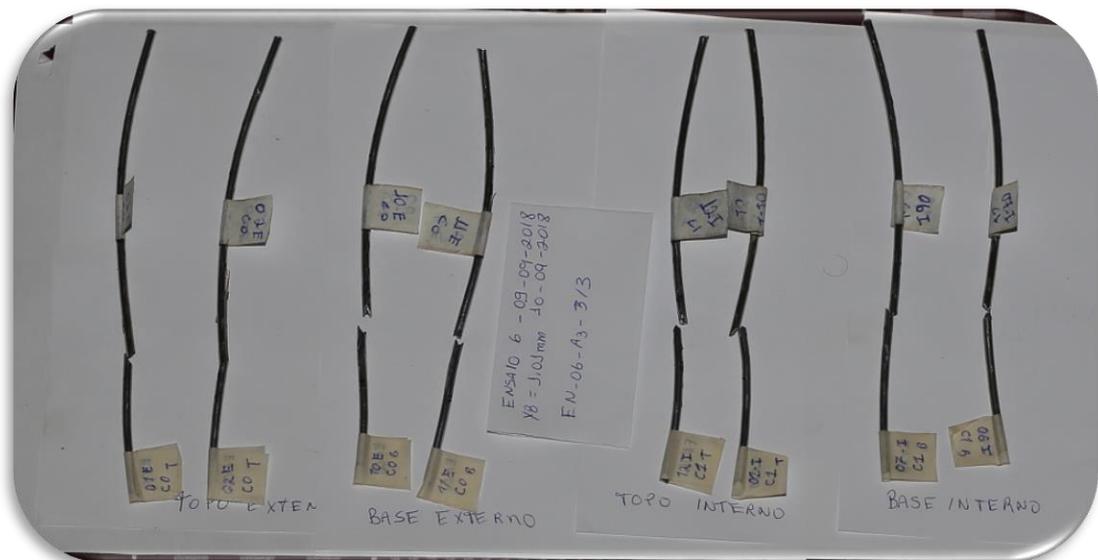


Figura C-26 – Foto dos sete fios que falharam no EN-06_A3_3/3_75°C

Foi possível acompanhar a evolução das quebras pelo comportamento da tensão média experimental $P-S$ nos fios de topo durante o ensaio. Assim como nos demais ensaio o comportamento serviu para avaliar a margem de erro imposta, na correlação entre amplitude Y_b e tensão nominal calculada pela utilização da fórmula de $P-S$ em função do tempo de ensaio,

⁴ Identificação realizada baseada na inspeção visual.

e é mostrado na figura C-27. O erro apresentou comportamento semelhante aos demais ensaios, houve um aumento após a ocorrência da primeira quebra, após isto, o erro cresceu de forma abrupta, chegando a passar de 250% no final do ensaio,

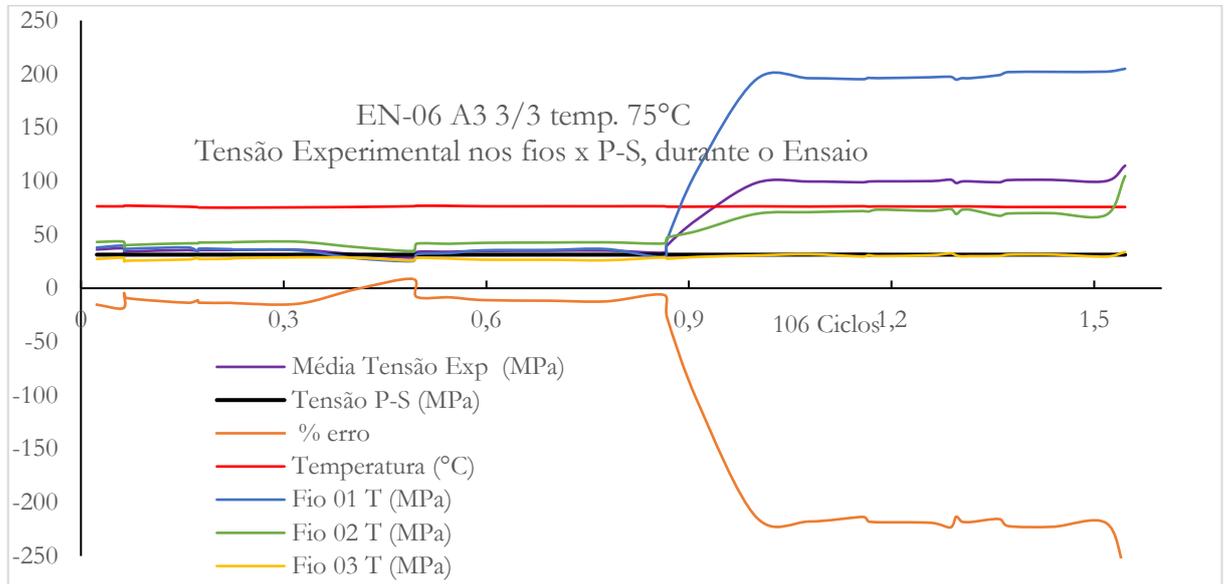


Figura C-27 – EN-06_A3_1/3_75°C Tensão experimental nos fios x P-S durante o Ensaio

ENSAIOS DA SEGUNDA ETAPA (E2) GRUPO DE AMOSTRAS E2-YB_s-21°C

Memorial de ensaio EN-12_A1_21°C_CE04_E2

Para este ensaio foi utilizado o CE-04, que já tinha um histórico de ciclos de cinco milhões e duzentos mil ciclos, somando se os dois ensaios anteriores, EN 10 e EN 11. Este por ser em temperatura ambiente, não houve o monitoramento constante o que ocasionaram várias interrupções, prolongando assim, mais os dias em que a amostra permaneceu na bancada. Portanto, foi realizado nos dias 30, 31 e 01 de novembro, rodou até dois milhões e quinhentos mil ciclos, foi identificada três quebras, sendo duas externas e uma interna. O que se observou, que o fenômeno das quebras aconteceu quase que simultaneamente, diferença de cem mil ciclos aproximadamente uma da outra. A figura C-28 apresenta a estatísticas dos sinais captados pelos extensômetros (registros das quebras) e termopar (registros da temperatura de ensaio).

Os quadros C-27 e C-27 apresentam o resumo de ensaio e fios rompidos e quantidades de ciclos N. A figura C-29 apresenta o comportamento da tensão média experimental *P-S* nos fios de topo durante o ensaio, observou a inversão do comportamento relacionado ao erro, aqui o erro aumenta e após as quebras diminuiu, ao contrário do que se observou nos ensaios em 75°C.

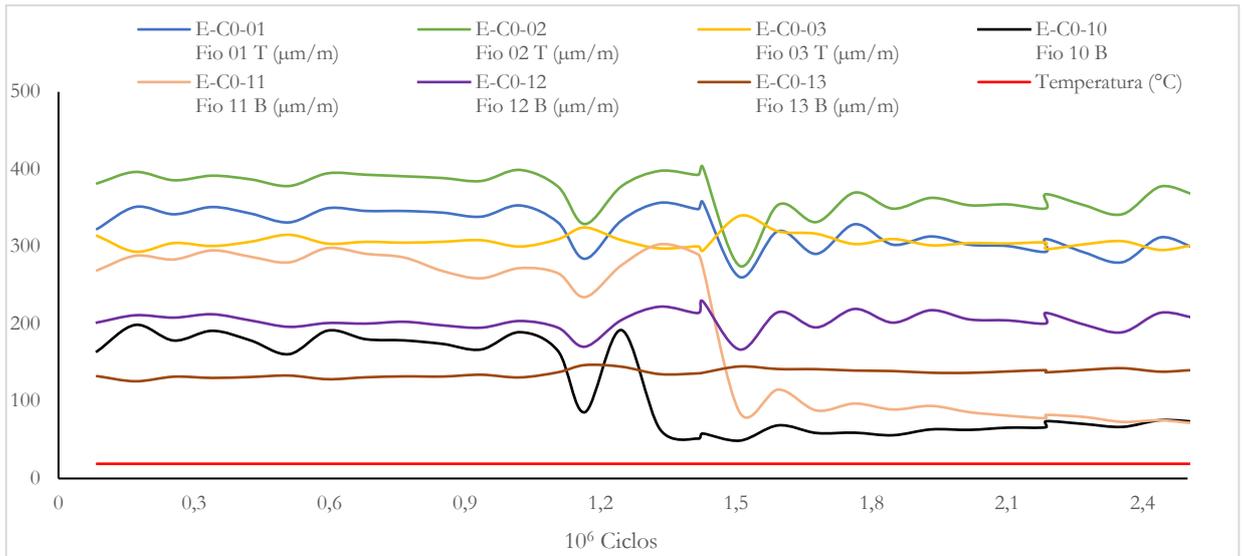


Figura C-28 – Detecção das quebras, EREs colados no EN-12_A1_3/3_21°C

Quadro C-27– Resumo de ensaio e do ensaios e quebras do EN-12_A1_2/3_21°C

EN-12_21°C	29/11/2018 01/12/2018	YB 0,87	Nº [fio]	DMF [mm]	Nº [fio]	DMF [mm]
3 Quebras 2,53E+06	externa	2	E-C0-10	(31,04) ^{B-L}	E-C0-11	(34,36) ^{B-45}
	interna	1	I-C1-12	(37,81) ^{T-V}		

Quadro C-28 – Ordem das quebras e quantidade de ciclos N.

EN-12	Fio	Fio	DMF [mm]	Ciclos	Ciclos
1ª quebra	I-C1-12	12 int. T	(35,45) ^{T-V}	1246572,88	1,25E+06
2ª quebra	E-C0-10	10 ext. B	(28,61) ^{B-L}	1426188,92	1,43E+06
3ª quebra	E-C0-11	11 ext. B	(30,50) ^{B-45}	1508721,69	1,51E+06

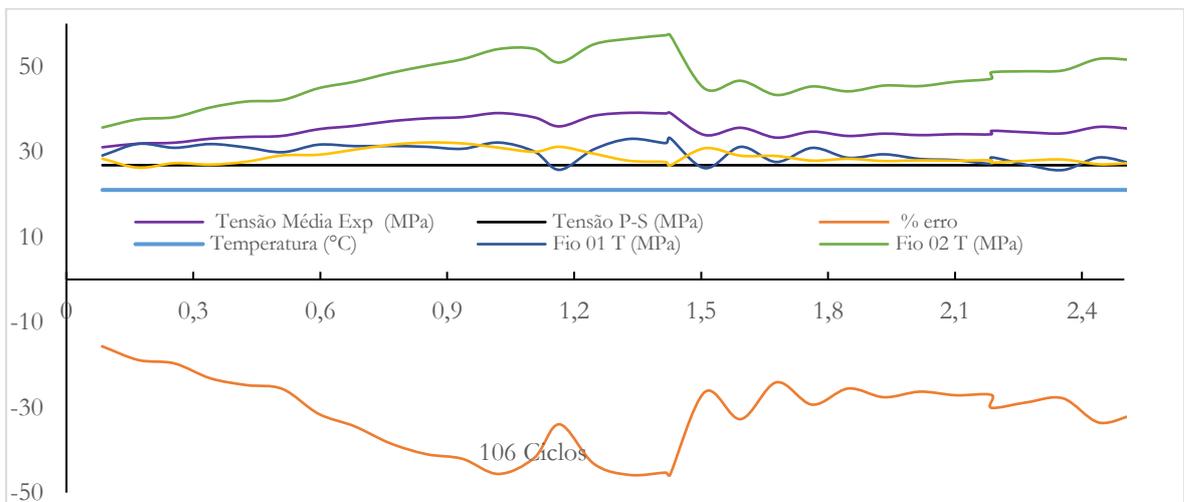


Figura C-29 – EN-12-A1-21°C. Tensão experimental nos fios x P-S durante o Ensaio

Memorial de ensaio EN-13_A1_21°C_CE05_E2

O EN-13_A1_1/3, foi utilizado um cabo novo, o CE-05, ensaiado pela primeira vez nos dias 06, 07, 27 e 28 de novembro. O ensaio foi interrompido durante vinte dias, devido a reforma do laboratório e ficou tracionado na bancada aguardando a liberação do laboratório pela equipe técnica, o que ocasionou variação nos sinais dos extensômetros, entretanto, não houve prejuízos nos resultados do ensaio, ao todo o ensaio rodou um milhão e duzentos mil ciclos, apresentou uma quebra externa e foi finalizado. Devido a temperatura ambiente não houve o monitoramento ininterrupto. Embora os sinais registrados tenham ficado com muito ruído, foi possível identificar a quantidade de ciclos referente a quebra. O quadro C-28 apresenta o resumo do ensaio, e os dados da quebra. A figura C-30 apresenta o comportamento da tensão média experimental $P-S$ nos fios de topo durante o ensaio, observa-se um comportamento diferente dos ensaios em $75^{\circ}C$, não se pode afirmar se este é o comportamento para todos os ensaios em temperatura de $21^{\circ}C$ devido ao longo período em que a amostra ficou na bancada, requerendo assim, mais investigação.

Quadro C-28- Resumo do ensaio e da quebra do EN-13_A1_1/3 21°C

EN-13 Amb	06/11/2018 27/11/2018	YB 0,87	N° [fio]	DMF [mm]	1 quebra	Ciclos
1 Quebra 1,35E+06	externa	1	E-C0-10	(31,40) ^{B-L}	Fio	10 ext. B
	interna	0			1172025,084	1,17E+06

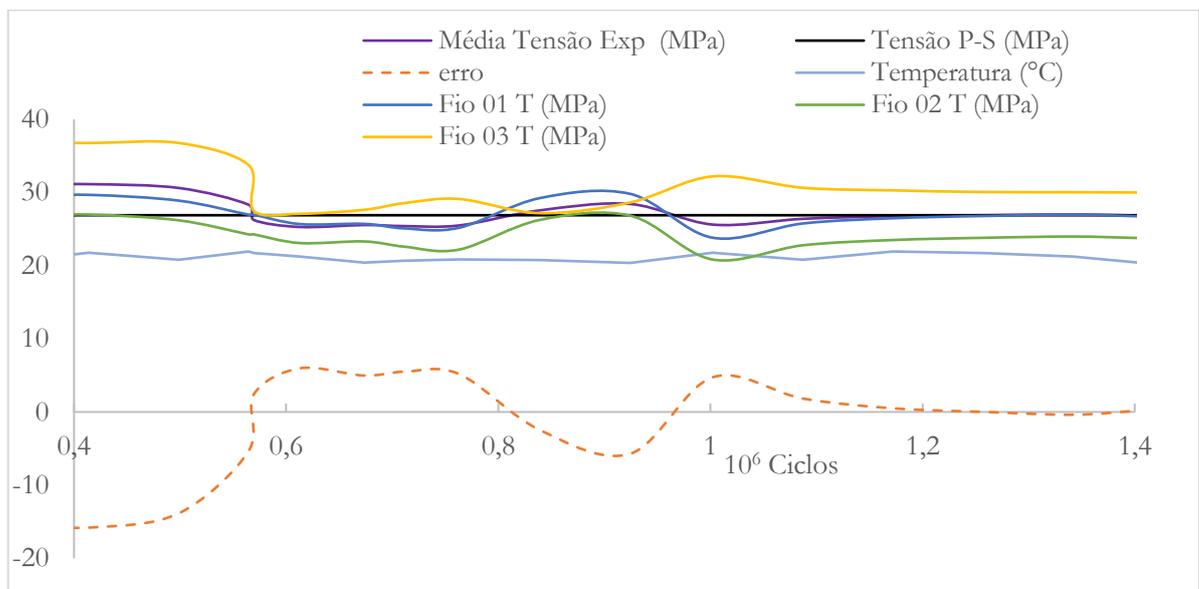


Figura C-30-EN-13-A1_1/3 21°C. Tensão experimental nos fios x P-S em função do tempo.

Memorial de ensaio EN-14_A2_21°C_CE05_E2

O EN-14_A2_2/3, também foi realizado com o CE05, neste ensaio utilizou se uma amplitude de 0,91 mm, e foi realizado nos dias 10, 11 e 12 de dezembro, a amostra já tinha um histórico de um milhão e duzentos mil ciclos. No EN 14 rodou mais um milhão e duzentos mil ciclos e foram observadas quatro quebras internas. No dia 10/12/2018 rodou 249991,048 ciclos ficou parado e voltou no dia 11/12/2018 aos 267185,4054 ciclos, seguindo direto até a finalização do ensaio as 00:30 do dia 12/12/2018, as quebras foram identificadas seguindo a mesma metodologia relatada no capítulo 3.

Apesar das interrupções do ensaio os sinais dos extensômetros foram utilizados para a detecção das quebras, entretanto houve somente quebras internas das quais ainda não se estabeleceu padrão claro de identificação em tempo real, a figura C-31 apresenta o gráfico após as análises de dados e tratamento dos sinais, para o comportamento da tensão da tensão média experimental $P-S$ nos fios de topo durante o ensaio, observa-se um comportamento parecido com os ensaios em $75^{\circ}C$, uma possível explicação, pode ser o comportamento inicial das quebras internas que foram identificadas na maioria dos ensaio com esta temperatura de ensaio. Entretanto, não se pode afirmar esta hipótese devido a pequena quantidade de ensaios realizados em temperatura de $21^{\circ}C$, mas é evidente que houve diferenças no comportamento da tensão média de $P-S$ em função do tempo, entre as temperaturas ensaiadas. O quadro C-29 apresenta o resumo do ensaio e o quadro C-30 a ordem das quebras e quantidade de ciclos N.

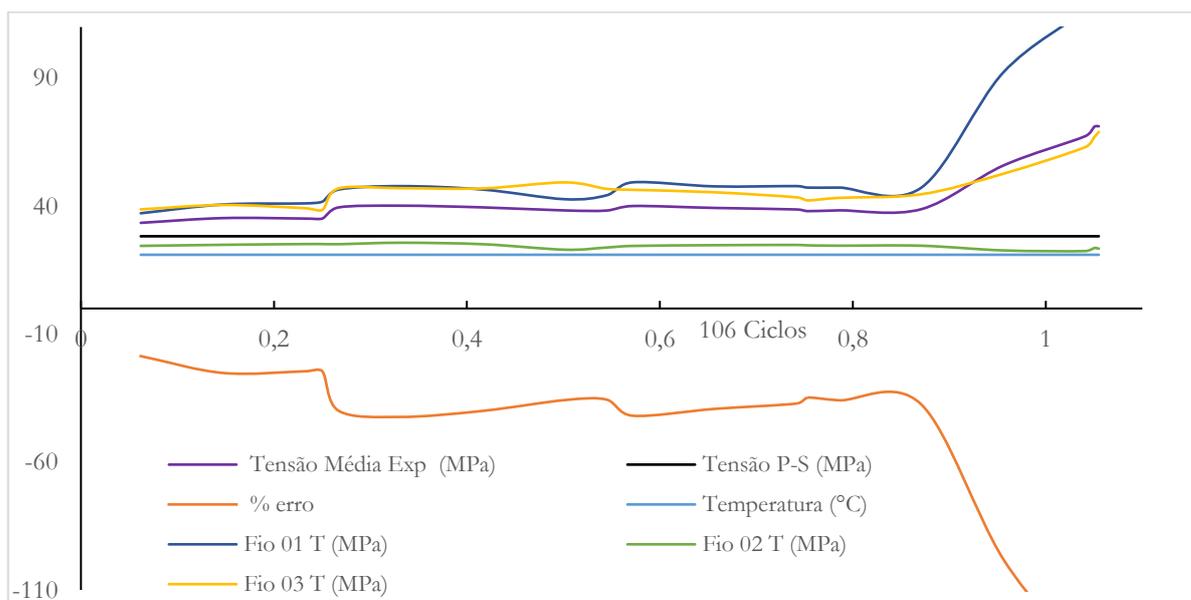


Figura C-31 – EN-14_A2_1/3_21°C. Tensão experimental nos fios x P-S durante o Ensaio

Quadro C-29 – Ordem das quebras e quantidade de ciclos N. EN-14_A2_2/3_21°C

EN-14- Amb	Fio	Fio	DMF [mm]	Ciclos	Ciclos
1ª quebra	I-C1-07	07 int. B	(32,16) ^{B-L}	726302,3	7,26E+05
2ª quebra	I-C1-06	06 int. B	(28,85) ^{B-45}	940212,5	9,40E+05
3ª quebra	I-C1-12	12 int. T	(38,41) ^{T-45}	949054,10	9,49E+05
4ª quebra	I-C1-01	01 int. T	(32,58) ^{T-45}	1040766,21	1,04E+06

Quadro C-30 – Resumo do ensaio e quebras do EN-14_A2_2/3_21°C

EN-14 Amb	10/12/2018 12/12/2018	Yb 0,91	Nº [fio]	DMF [mm]	Nº [fio]	DMF [mm]	Nº [fio]	DMF [mm]	Nº [fio]	DMF [mm]
4 Quebras 1,05E+06	externa	0								
	interna	4	I-C1-12	(41,43) ^{T-45}	I-C1-01	(36,41) ^{T-45}	I-C1-06	(31,82) ^{B-45}	I-C1-07	(36,39) ^{B-L}

Memorial de ensaio EN-15_A3_21°C_CE-05_E2

Para a amplitude de 1,01 mm, foi realizado o EN-15_A3_3/3 com o mesmo CE-05 o qual já tinha sido usado no ensaio 14, e apresentava uma estatística de dois milhões e quatrocentos mil ciclos. O ensaio foi realizado nos dias 20 e 21 do mês de dezembro, devido a temperatura ambiente, não houve o monitoramento ininterrupto. O ensaio foi realizado de um dia para o outro o que colaborou com os sinais gravados dos extensômetros. Foi identificado uma quebra externa (figura C-32) em aproximadamente seiscentos e dez mil ciclos, então, o ensaio foi finalizado com aproximadamente seiscentos e cinquenta mil ciclos, pois o intuito era registrar apenas a primeira quebra.

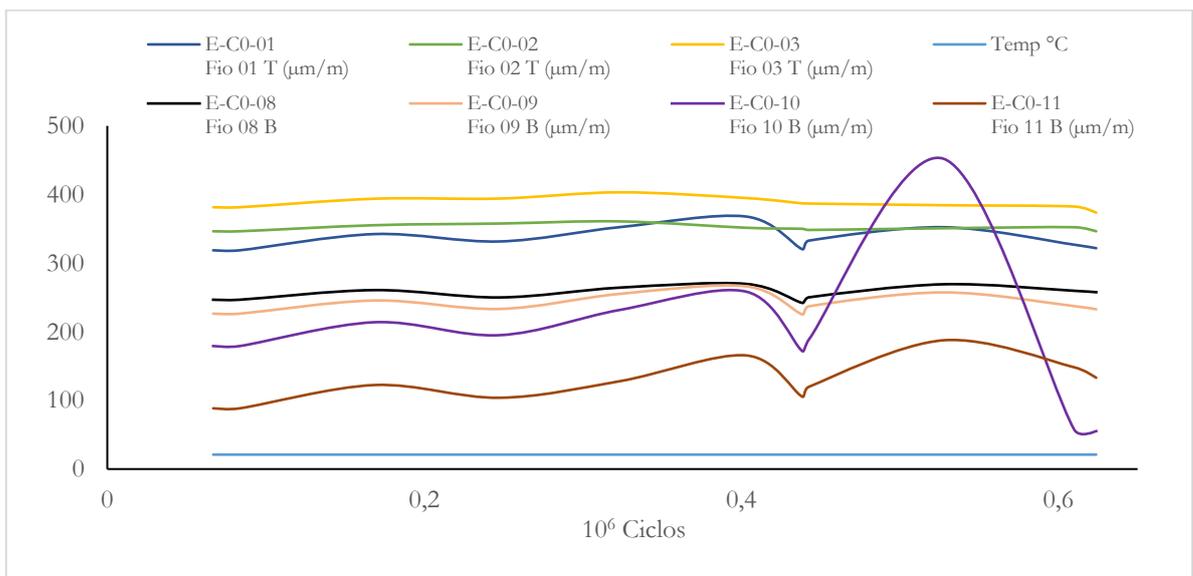


Figura C-32 – Detecção da quebra, EREs colados no CE, EN-15_A3_3/3_21°C

O quadro C-31 apresenta o resumo de ensaio e quebra. A figura C-33 apresenta o comportamento da tensão média experimental $P-S$ nos fios de topo durante o ensaio, conforme o comportamento observado nos ensaios 12 e 13, também foi observado a inversão do comportamento relacionado ao erro, diminuiu após a quebra ao contrário do que se observou nos ensaios em temperatura de 75°C .

Quadro C-31 – Resumo de ensaio e quebra do EN-15_A3_3/3_21°C

EN-15_21°C	20/12/2018 21/12/2018	YB 1,01	Nº [fio]	DMF [mm]	Ciclos	10^5
1 Quebras $6,24E+05$	externa	1	E-C0-10	(36,36) ^{B-QP}	609971,1559	6,10E+05
	interna	0			Fio 10 ext. B	

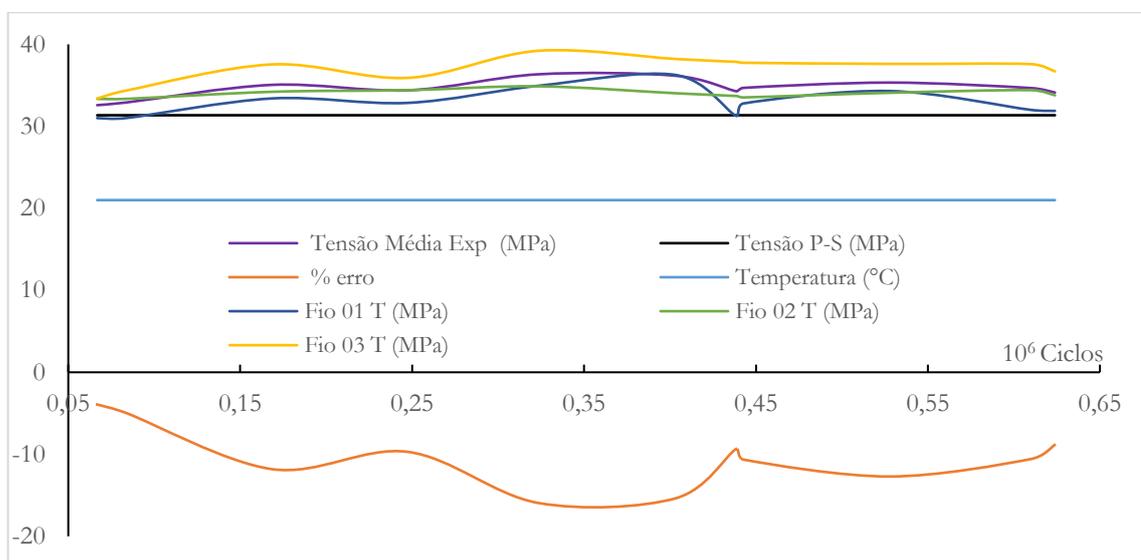


Figura C-33 – EN-15_A3_3/3_21°C. Tensão experimental nos fios x P-S durante o Ensaio

ENSAIOS DA SEGUNDA ETAPA (E2) GRUPO DE AMOSTRAS E2-YB_S-75°C

Aqui serão apresentados o memorial dos ensaios que compõem o grupo de amostra para compor a curva S-N em 75°C da E2.

Memorial de ensaio EN-16_A1_75°C_E2

Para compor a curva S-N em temperatura de 75°C , foram realizados três ensaios o ponto com amplitude de $0,87\text{ mm}$ foi denominado de EN-16_A1_1/3_75°C, o qual compôs o primeiro ponto, usando um CE-06 novo, o ensaio rodou um milhão e duzentos mil ciclos e apresentou duas quebras internas, então o ensaio foi finalizado. O quadro C-32 apresenta o

resumo de ensaio, e o quadro C-33 apresenta a ordem das quebras e quantidade de ciclos N. Sendo assim, a figura C-34 mostra a identificação das duas quebras internas, e a figura C-35 apresenta o comportamento da tensão média experimental $P-S$ nos fios de topo durante o ensaio, apresenta comportamento parecido com os demais ensaios em 75°C .

Quadro C-32 – Resumo do ensaio e das quebras do EN-16_A1-75°C

EN-16 75°C	25/12/2018 25/12/2018	YB 0,87	Nº [fio]	DMF [mm]	Nº [fio]	DMF [mm]
2 Quebras 2,18E+06	externa	0				
	interna	2	I-C1-12	(35,61) ^{T-45}	I-C1-01	(38,09) ^{T-45}

Quadro C-33 – Ordem das quebras e quantidade de ciclos N. EN-16_A1-75°C

EN-16	Fio	Fio	DMF [mm]	Ciclos	Ciclos
1ª quebra	I-C1-12	12 int. T	(35,61) ^{T-45}	1026828,92	1,03E+06
2ª quebra	I-C1-01	01 int. T	(36,19) ^{T-45}	1959142,92	1,96E+06

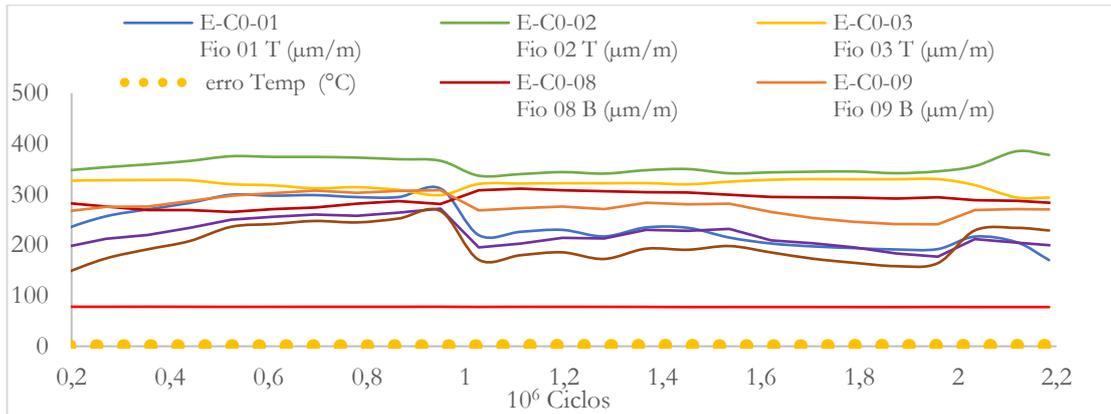


Figura C-34 – Detecção da quebra, EREs colados no CE no EN-16_A1_1/3_75°C

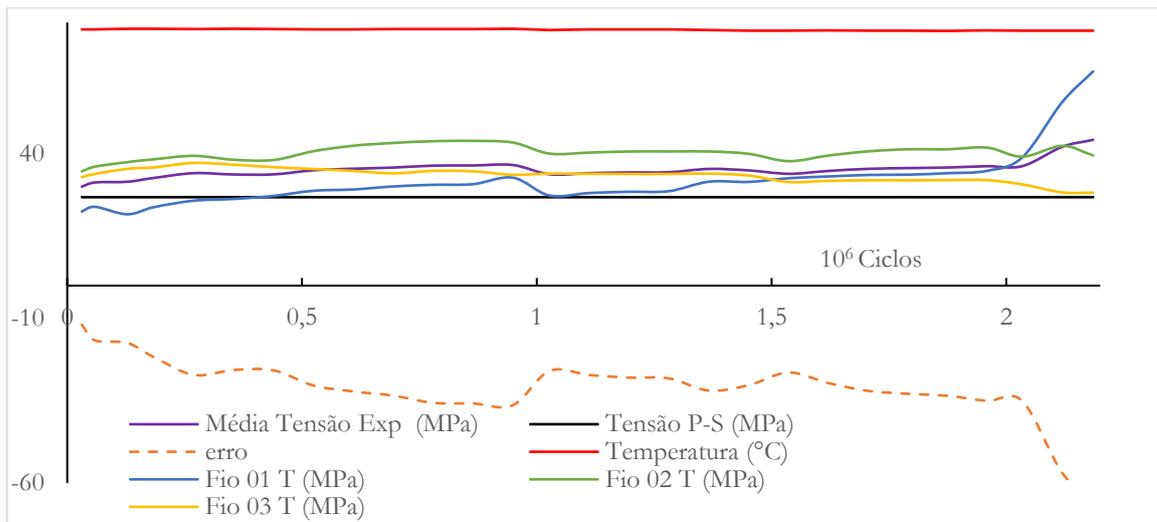


Figura C-35 – EN-16_A1_1/3_75°C. Tensão experimental nos fios x P-S durante o Ensaio

Memorial de ensaio EN-18_A2_75°C_E2

Para compor o segundo ponto da curva S-N foi realizado o EN 18 com amplitude de 0,91 mm, com o mesmo CE-06 que tinha um histórico de um milhão e duzentos ciclos do EN-16 e dois milhão de ciclos do EN-17, que não apresentou quebras. Sendo assim, foi repetido o ensaio com os mesmos parâmetros. O EN-18 foi realizado nos dias 27 e 28 de dezembro, e teve setecentos e vinte mil ciclos, quando foi observado a quebra externa, e finalizado o ensaio. A quebra identificada e apresentada na figura C-36, já a figura C-37 apresenta o comportamento da tensão média experimental *P-S* nos fios de topo durante o ensaio, apresenta comportamento parecido com os demais ensaios realizados com a temperatura de 75°C. O quadro C-34 apresenta o resumo para o ensaio e quebra.

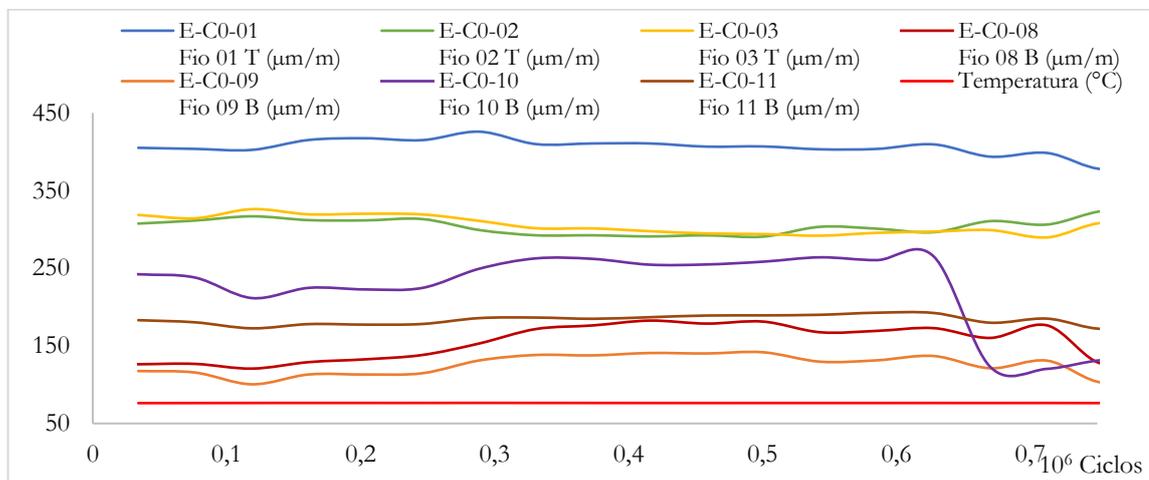


Figura C-36 – Detecção da quebra, EREs colados no CE, EN-18_A2_2/3_75°C

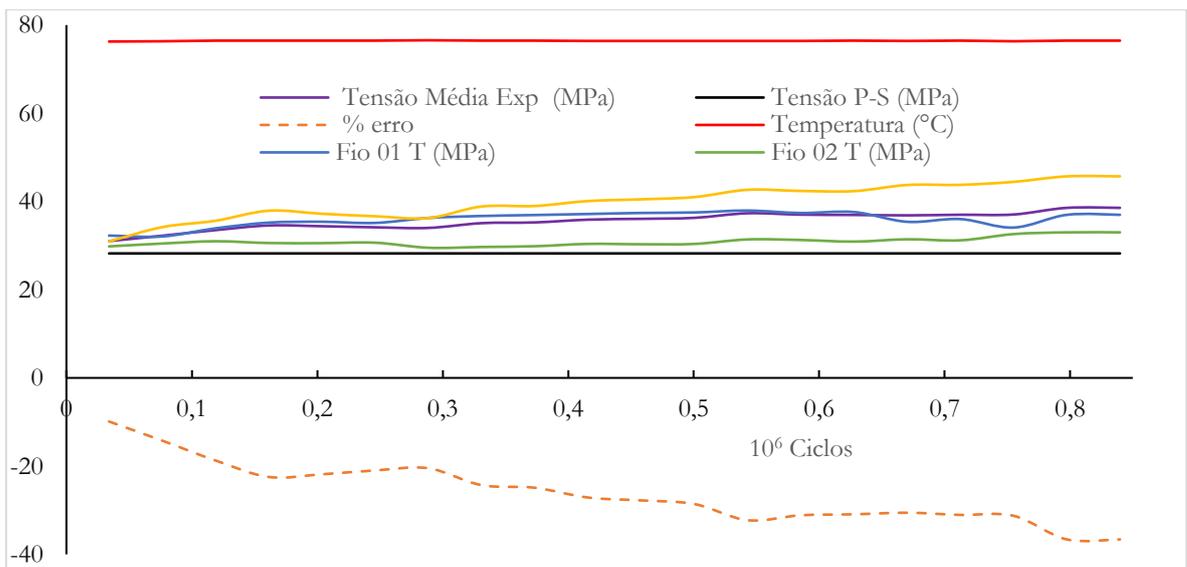


Figura C-37 – EN-18_A2_3/3_75°C. Tensão experimental nos fios x P-S durante o ensaio

Quadro C-34 – Resumo das quebras do EN-18_A2_3/3_75°C

EN-18 75°C	27/12/2018 - 28/12/2018	Yb 0,91	Nº [fio]	DMF [mm]	1 quebra
1 Quebra 0,72E+06	externa	1	E-C0-10	(33,54) ^{B-V}	Ciclos
	interna	0		0,67E+06	670349,17

Memorial de ensaio EN-05_A3_75°C_E2

O último ponto da curva SN será composto pela estatística do EN 05 realizado com uma amplitude de 1,01 mm, foi realizado no dia 04 de setembro, juntamente com os ensaios da E1, por apresentar muita instabilidade, rodou uma quantidade inferior a quantidade de ciclos da estatística para a curva comparativa desta etapa, sendo finalizado com aproximadamente um milhão de ciclos (916519,62). Assim, ele passou a integrar a curva da E2. Para o ensaio supracitado foi utilizado o CE-02, que havia um histórico de um milhão e setecentos mil ciclos do EN-04. Em todos os ensaios da E2 foram aplicados a mesma metodologia utilizado nos ensaios da E1, buscando sempre manter os parâmetros de utilização do CE, a fim de diminuir variáveis indesejáveis no ensaio, a diferença é que os ensaios foram finalizados ao observar a primeira quebra.

O quadro C-35 apresenta o resumo das quebras registradas. Como todas as quebras foram internas não foi possível identificável com propriedade os fios, entretanto é possível que a ordem das ocorrências siga a sequência apresentada no quadro C-36 devido aos movimentos apresentados nos gráficos da figura C-38 as identificações das quebras, e a figura C-39 apresenta o comportamento da tensão média experimental $P-S$ nos fios de topo durante o ensaio, e sinaliza um comportamento parecido com os demais ensaios realizados com a temperatura de 75°C.

Quadro C-35 – Resumo do ensaio e das quebras do EN-05_A3_2/3_75°C

EN-05 75°C	06/07/2018 07/07/2018	YB 1,01	Nº [fio]	DMF [mm]	Nº [fio]	DMF [mm]	Nº [fio]	DMF [mm]
3 Quebras 0,92E+06	externa	0						
	interna	3	I-C1-12	(31,77) ^{T-45}	I-C1-06	(26,12) ^{B-45}	I-C1-07	(31,21) ^{B-L}

Quadro C-36 – Ordem das quebras e quantidade de ciclos N. EN-05_A3_2/3_75°C

EN-05	Fio	Fio	DMF [mm]	Ciclos	Ciclos
1ª quebra	I-C1-06	06 int. B	(26,12) ^{B-45}	584570,259	5,85E+05
2ª quebra	E-C1-07	07 int. B	(31,21) ^{B-L}	850017,438	8,50E+05
3ª quebra	E-C1-12	12 int. T	(31,77) ^{T-45}	866967,667	8,67E+05

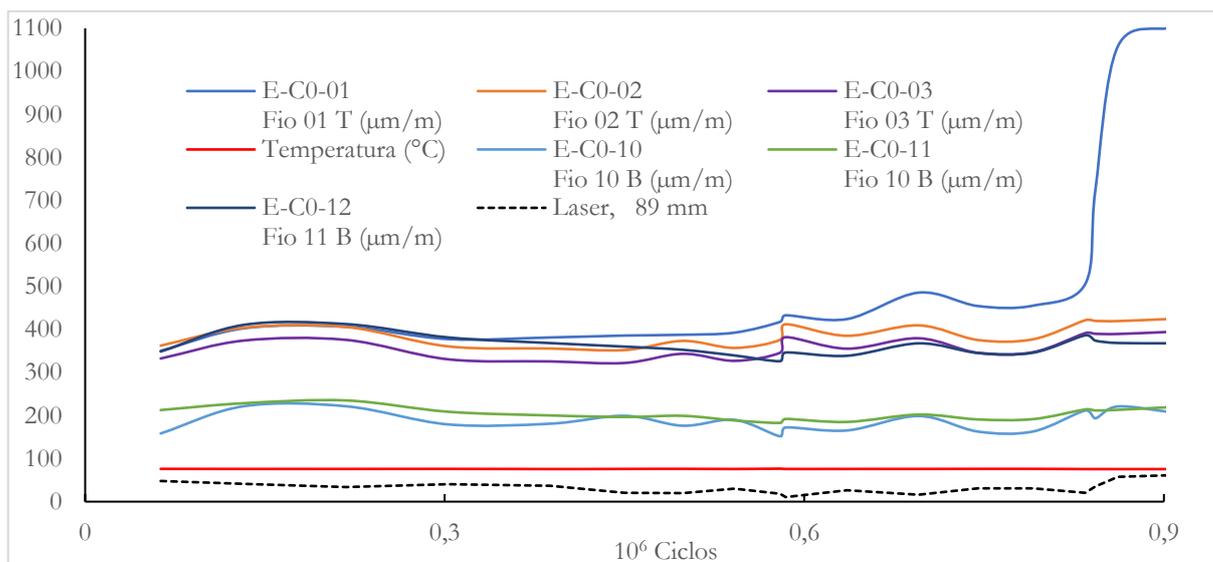


Figura C-38 – Detecção da quebra, EREs colados no CE, EN-05_A3_2/3_75°C

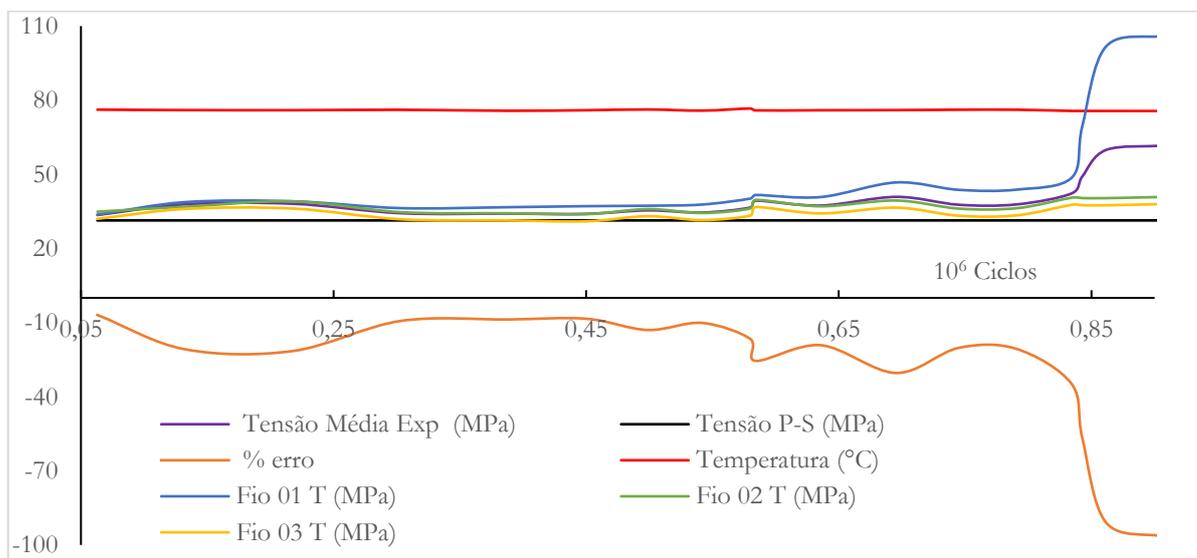


Figura C-39 – EN-05-A3-75°C. Tensão experimental nos fios x P-S durante o Ensaio

MEMORIAL DOS ENSAIOS SEM QUEBRAS

Nesta seção serão apresentados os dois ensaios que não romperam fios, isso foi feito a fim de mostrar o comportamento na deformação dos extensômetros em relação a interpretação das quebras ocasionadas durante o ensaio. Sendo assim, para efeito de demonstração serão apresentados alguns dos gráficos construídos a partir dos sinais captados pelos extensômetros durante os ensaios. O EN-01_A1_1/3_75°C_CE-01_E1, foi o primeiro ensaio a ser realizado para compor os resultados desta pesquisa, embora a quantidade de ciclos ultrapassou um milhão e oitocentos mil ciclos, não houve quebra. A figura C-40 apresenta os sinais da tensão experimental calculada nos fios. É possível perceber que durante a evolução do ensaio a tensão

de P-S se manteve quase constante, este fenômeno não foi observado nos ensaios em que houve quebras nos fios. Neste ensaio só foram utilizados três extensômetros no topo do CE.

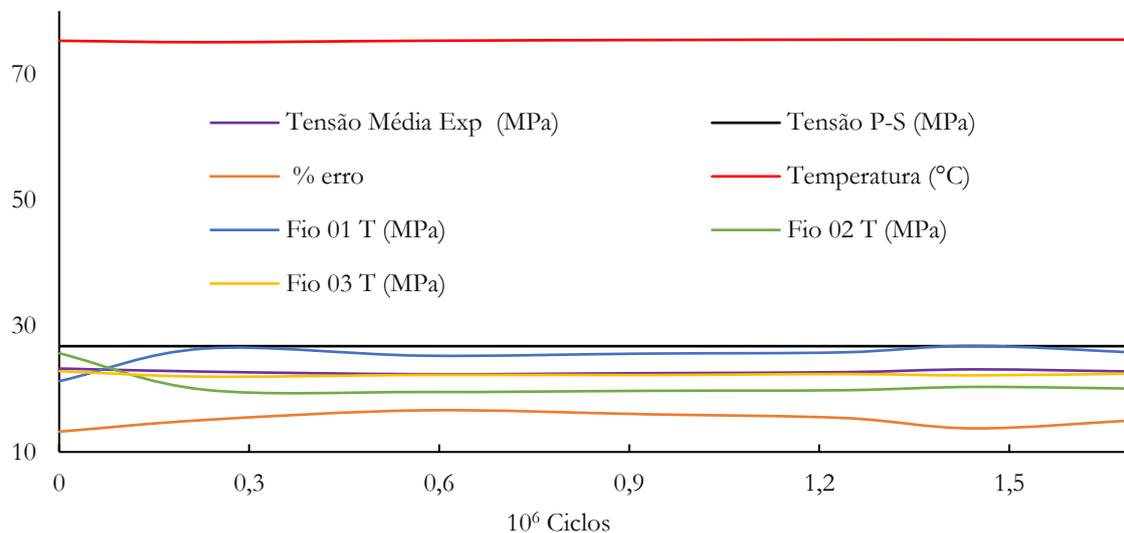


Figura C-40 – EN-01_A1_1/3_75°C. Tensão Experimental nos fios x P-S durante o Ensaio

Outro ensaio que não registrou quebra foi o EN-17_A2_2/3_75°C_CE-06_E2, realizado no dia 24/12/2018 e 25/12/2018, embora a quantidade de ciclos ultrapassou a estatística dos registros para as quebras nos outros ensaios com os mesmos parâmetros, este apresentou comportamento distinto. A figura C-41 demonstrou o comportamento dos fios durante o ensaio, e a figura C-42 apresenta o comportamento da tensão de P-S dos sinais dos extensômetros de topo, o erro se manteve estável.

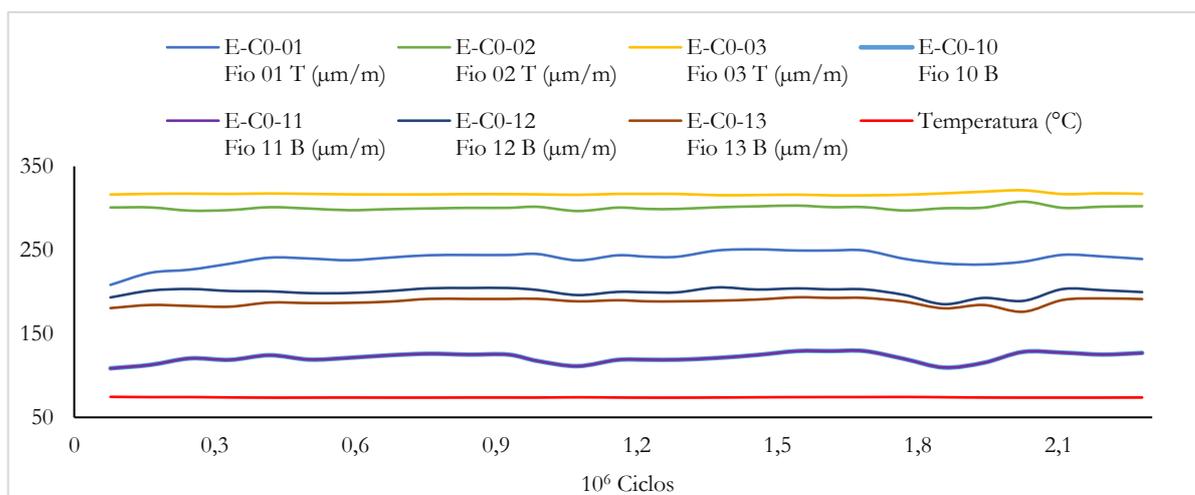


Figura C-41 – EN-17_A2_1/3_75°C. Sinal dos extensômetros.

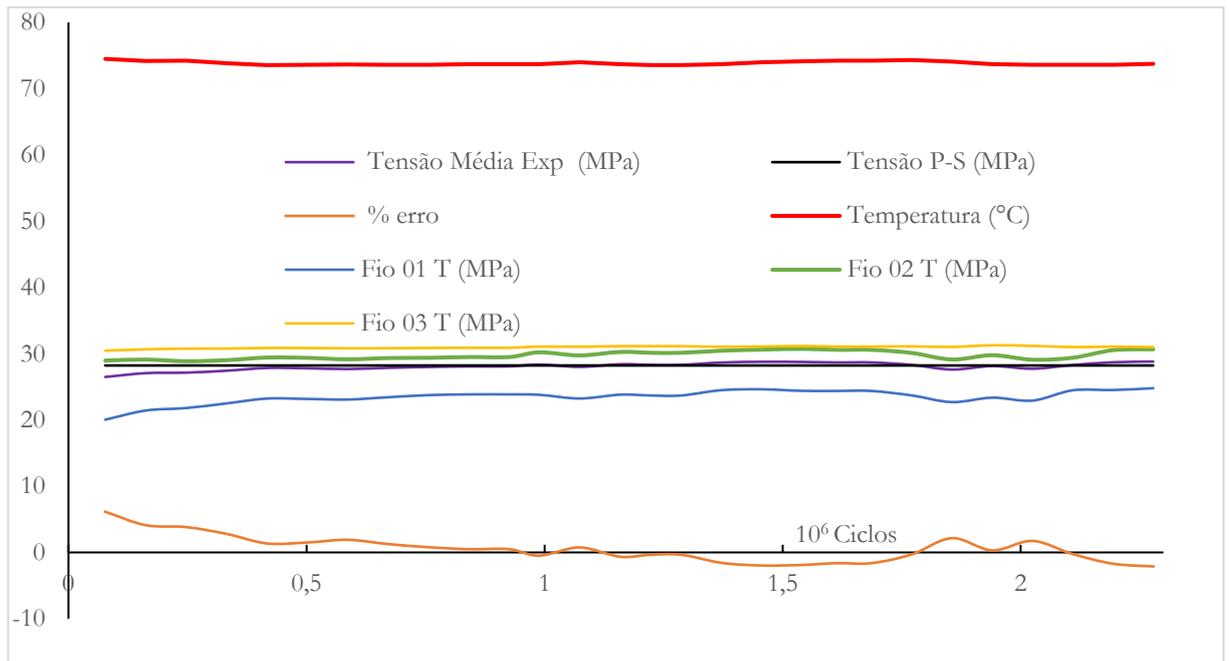


Figura C-42 – EN-17_A2_2/3_75°C. Tensão Experimental nos fios x P-S durante o Ensaio.

É importante ressaltar que seguindo o comportamento do EN-01 este ensaio também apresentou uma tensão média estável nos fios durante o processo, apresentando apenas algumas ondulações, mas sem perturbações aparentes, conforme observações notadas e a partir das inspeções visuais realizadas nos terminais de monitoração de ensaio.

APÊNDICE D

Leitura das quebras EXTERNAS através dos extensômetros em tempo real, ensaio EN-10, 75°C

ERE-01 fio E-C0-01, ERE-02 fio E-C0-02 e Quebra-ERE-01 fio E-C0-11, figura D.1

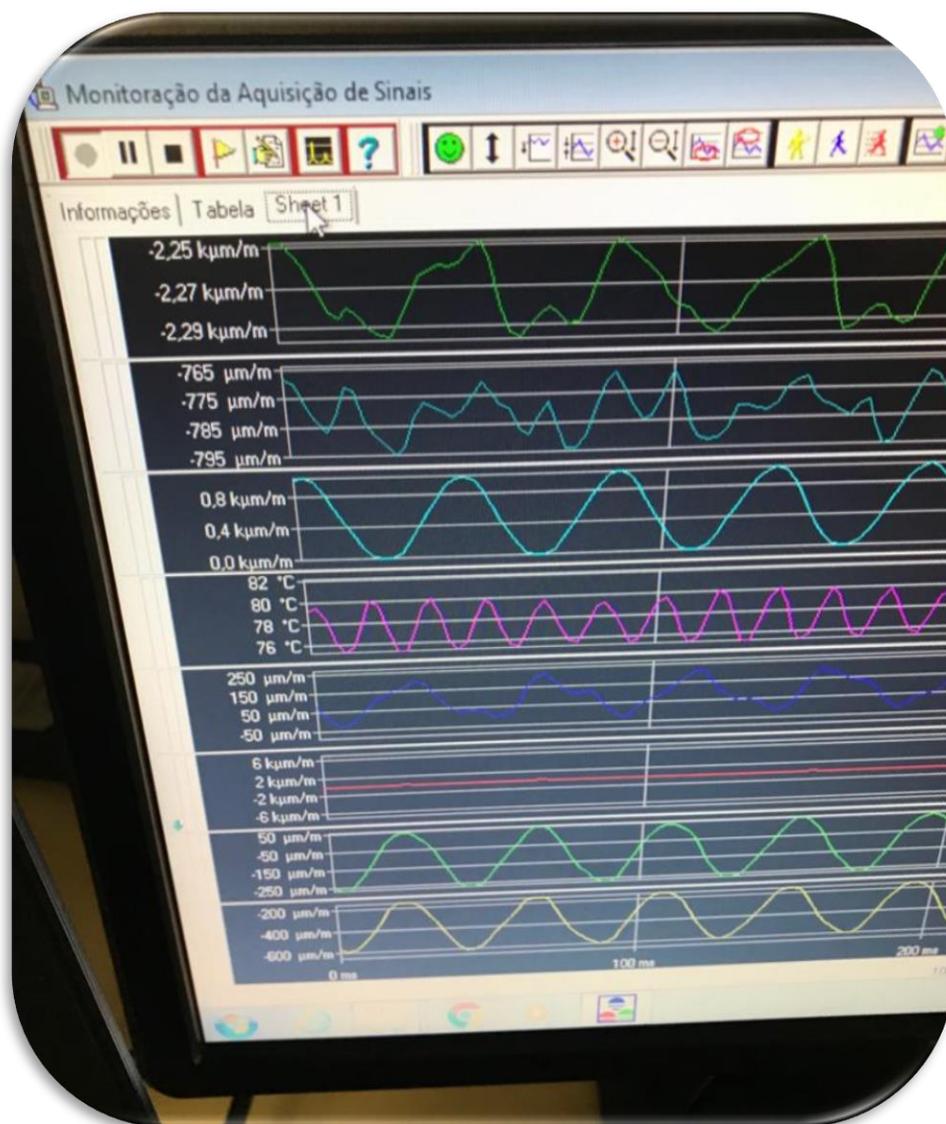


Figura D-1 – Indicação das três quebras externas, fio 01 topo, fio 02 topo e fio 11 base

Fios de topo no momento da quebra, figura D.2

ERE-01 fio E-C0-01

ERE-02 fio E-C0-02

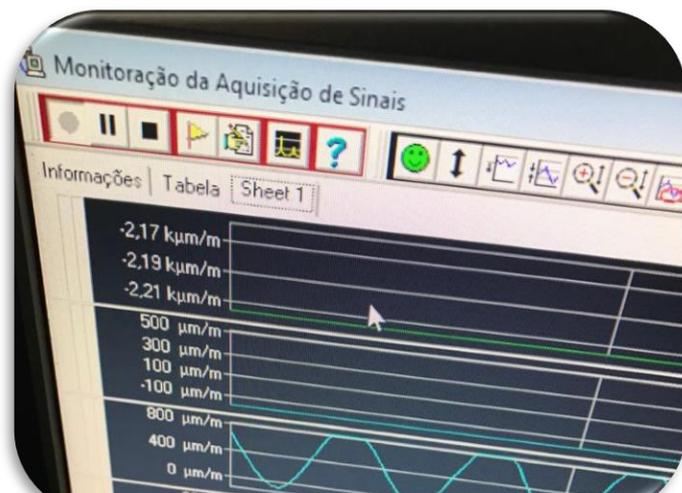


Figura D-2– Leitura das quebras externas do topo

Leitura das quebras INTERNAS através dos extensômetros em tempo real, ensaio EN-14 Temperatura ambiente. A figura D.3 mostra a tela de monitoração dos sinais dos extensômetros no início do ensaio, com as deformações iniciais.

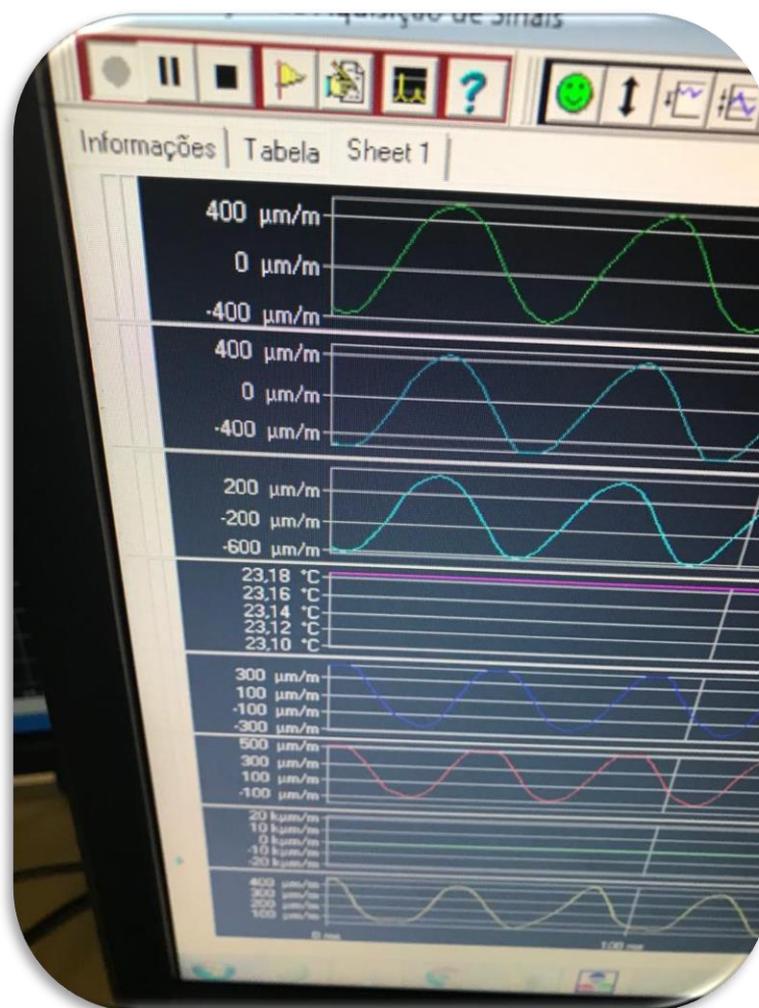


Figura D-3 – Tela de monitoração dos sinais dos extensômetros no início do ensaio

Leitura das deformações indicando as quebras INTERNAS através dos extensômetros em tempo real, ensaio EN-14 temperatura ambiente. Indicativo das quebras internas dos fios I-C1-12 fio 12 e I-C1-01 fio 01, figura D.4



Figura D-4 – Tela de monitoração dos sinais dos extensômetros indicando as quebras internas do topo

APÊNDICE E

Quadros das quebras dos sinais brutos captados pelos sensores durante os ensaios.

Na sequencias das figuras E-1 a E-7 a seguir, pode ser observado os quadros dos sinais do ensaio EN 9. Cada figura apresenta algumas das quebras identificadas. Exemplo: na figura E-1 mostra a primeira quebra interna no ensaio, no intervalo de 13 a 14 horas transcorrido o ensaio, conforme a indicação em vermelho. No primeiro quadro os sinais dos sete extensômetros, no segundo os sinais captados pelos lasers.

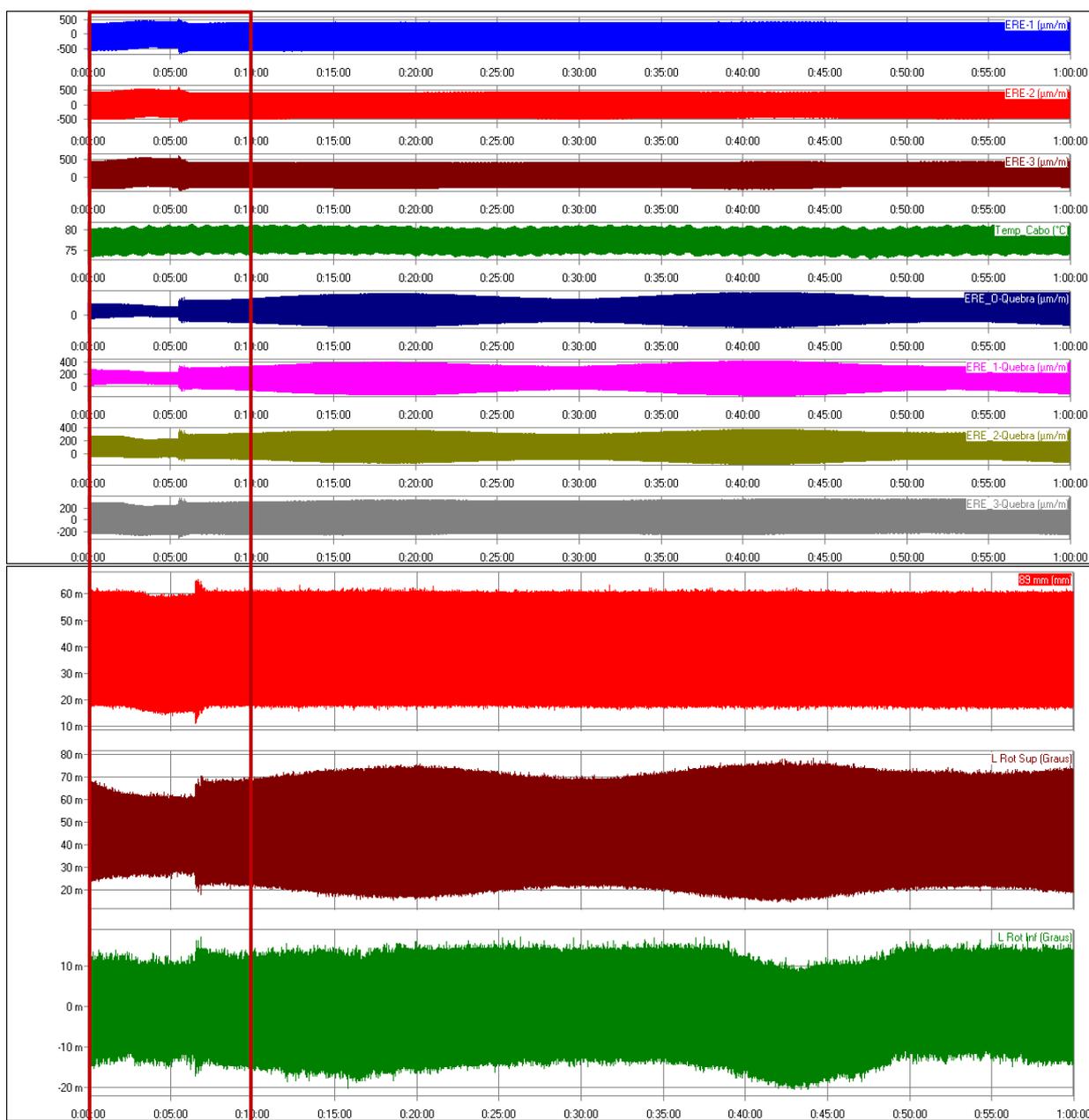


Figura E-1 - As 07:35 14, registro da 13^o hora de ensaio, primeira quebra interna, sinais dos extensômetros e lasers.

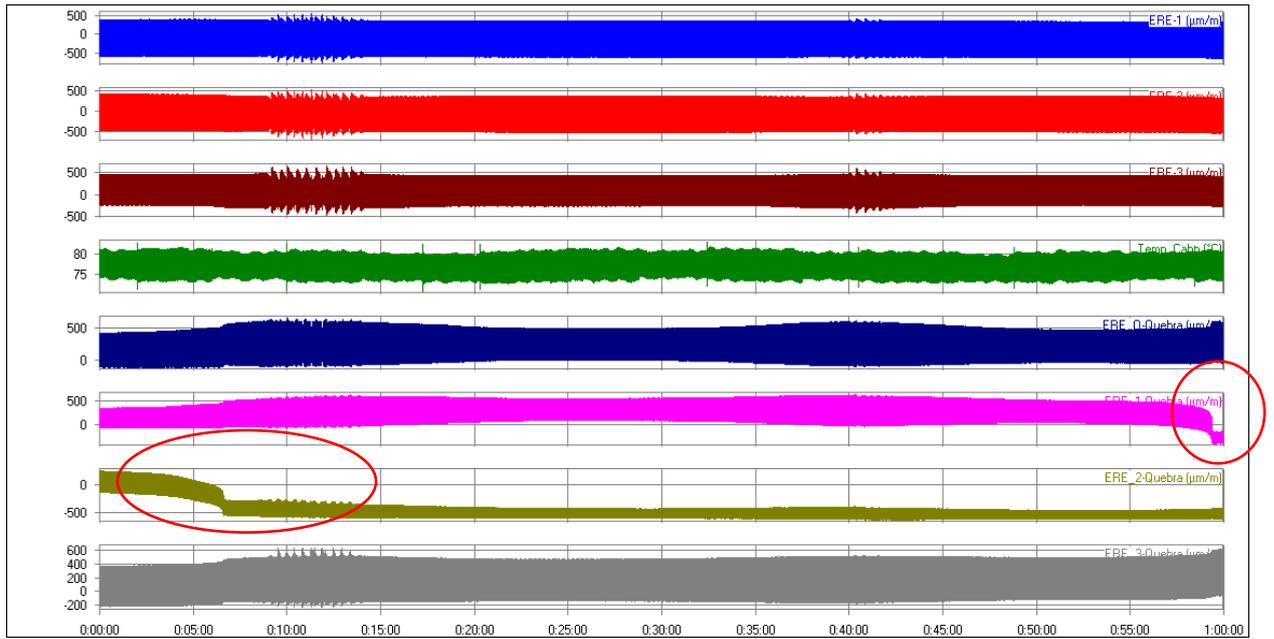


Figura E- 2 – Pacote 18, registro da 18^o hora de ensaio, quebras externas, fio 11, após fio 10. Sinais dos extensômetros.

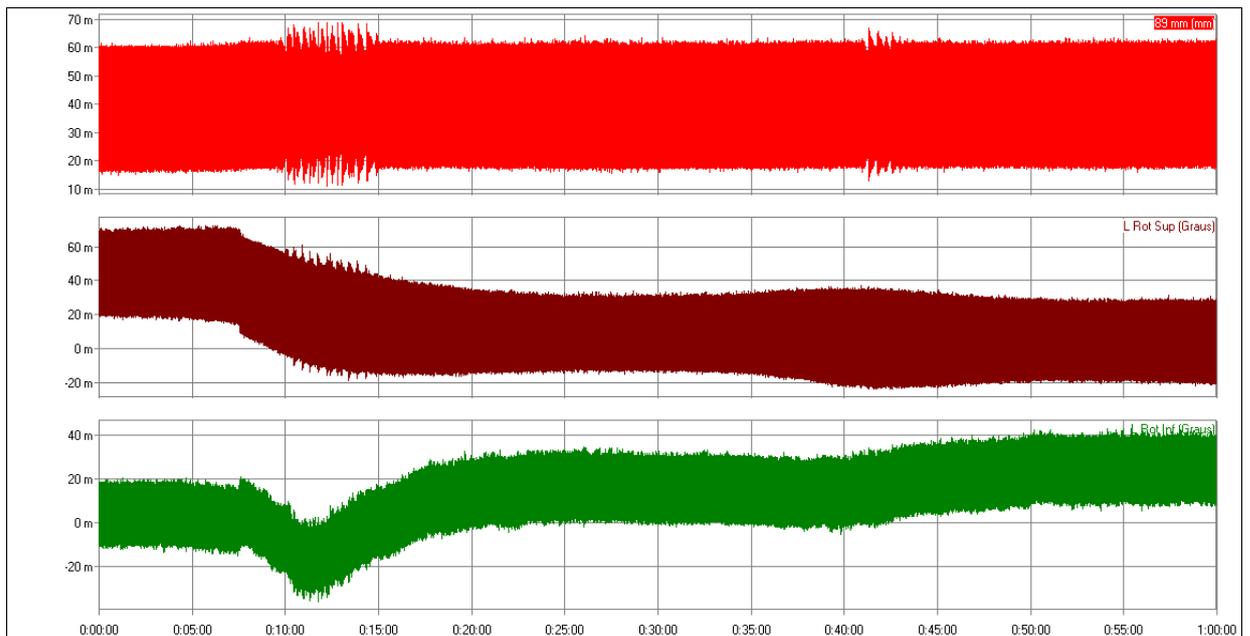


Figura E-3 – As 10:35 1, registro da 18^o hora de ensaio, sinais dos lasers

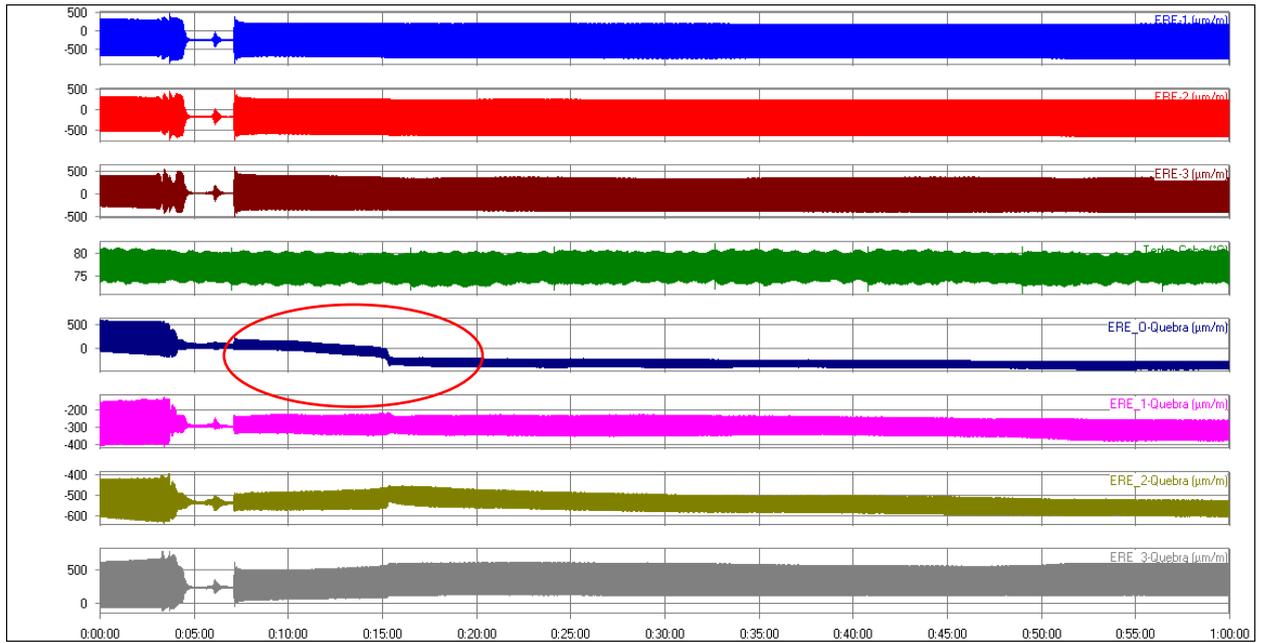


Figura E-4 – 19 Pacote 19, registro da 19^o hora de ensaio, quebra do fio 09 (ERE_0-Quebra Fio 09)

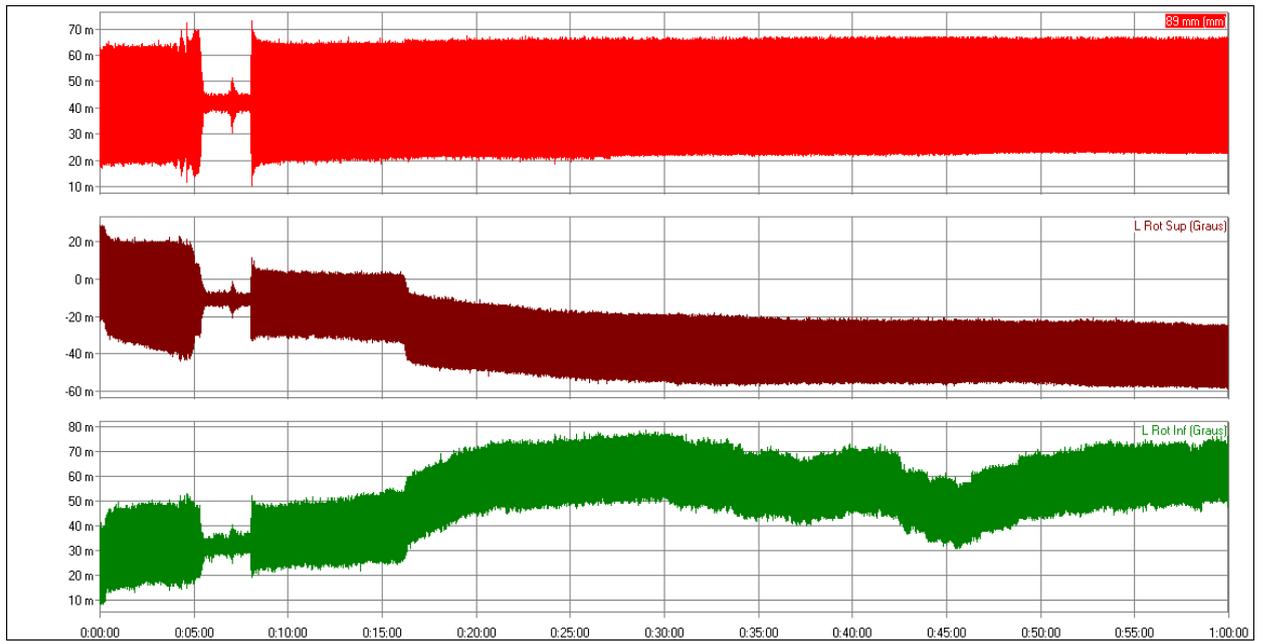


Figura E-5 – 11:35 registro da 18^o hora de ensaio, intervalo 18 às 19 horas, sinais dos lasers.

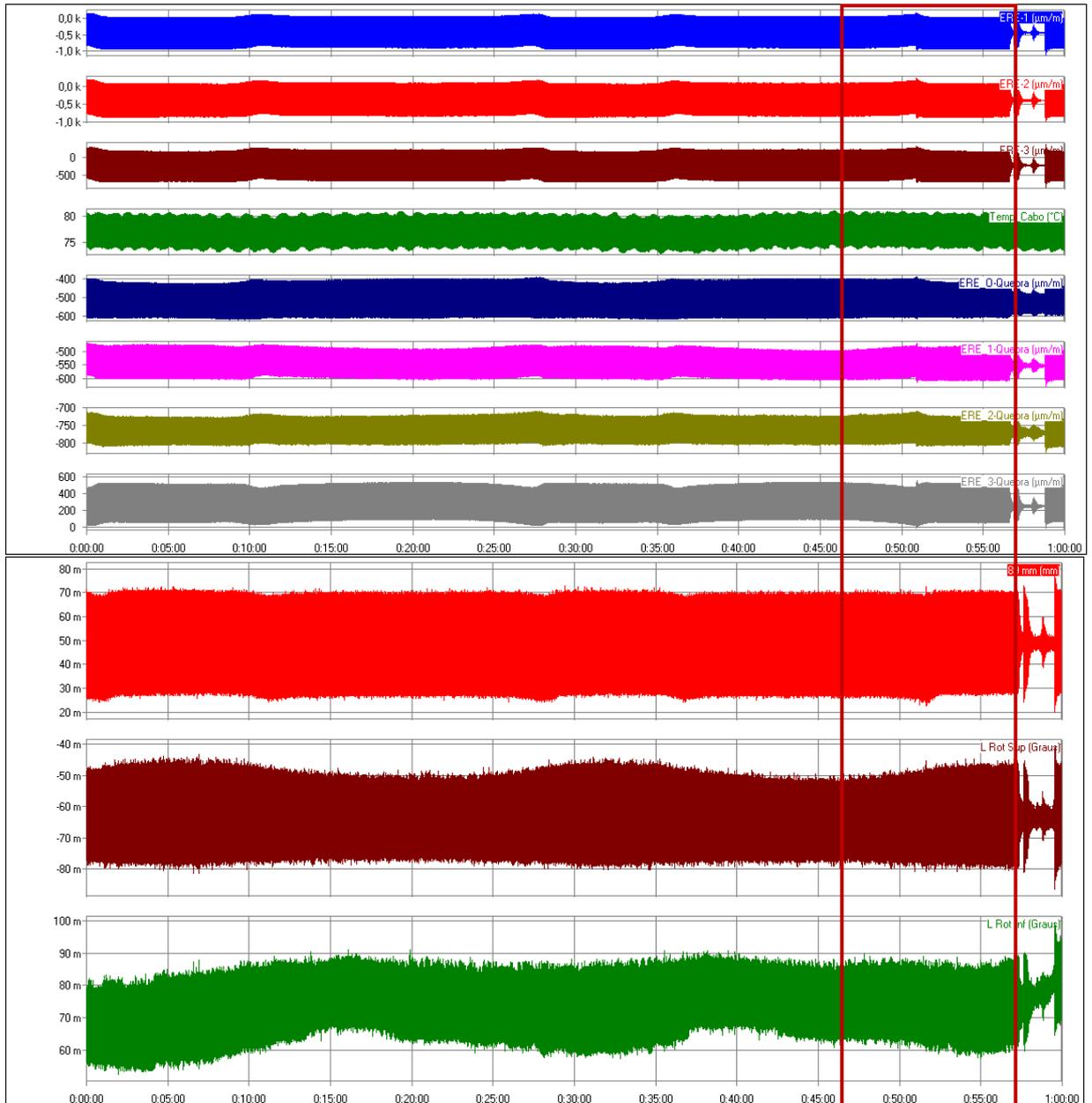


Figura E-6 – 23:35. Pacote 30, intervalo de 30 a 31 horas de ensaio, registro de quebra interna, aos 50 minutos da trigésima hora de ensaio. Registro de internas, registro da 30ª hora de ensaio, sinais dos extensômetros e lasers

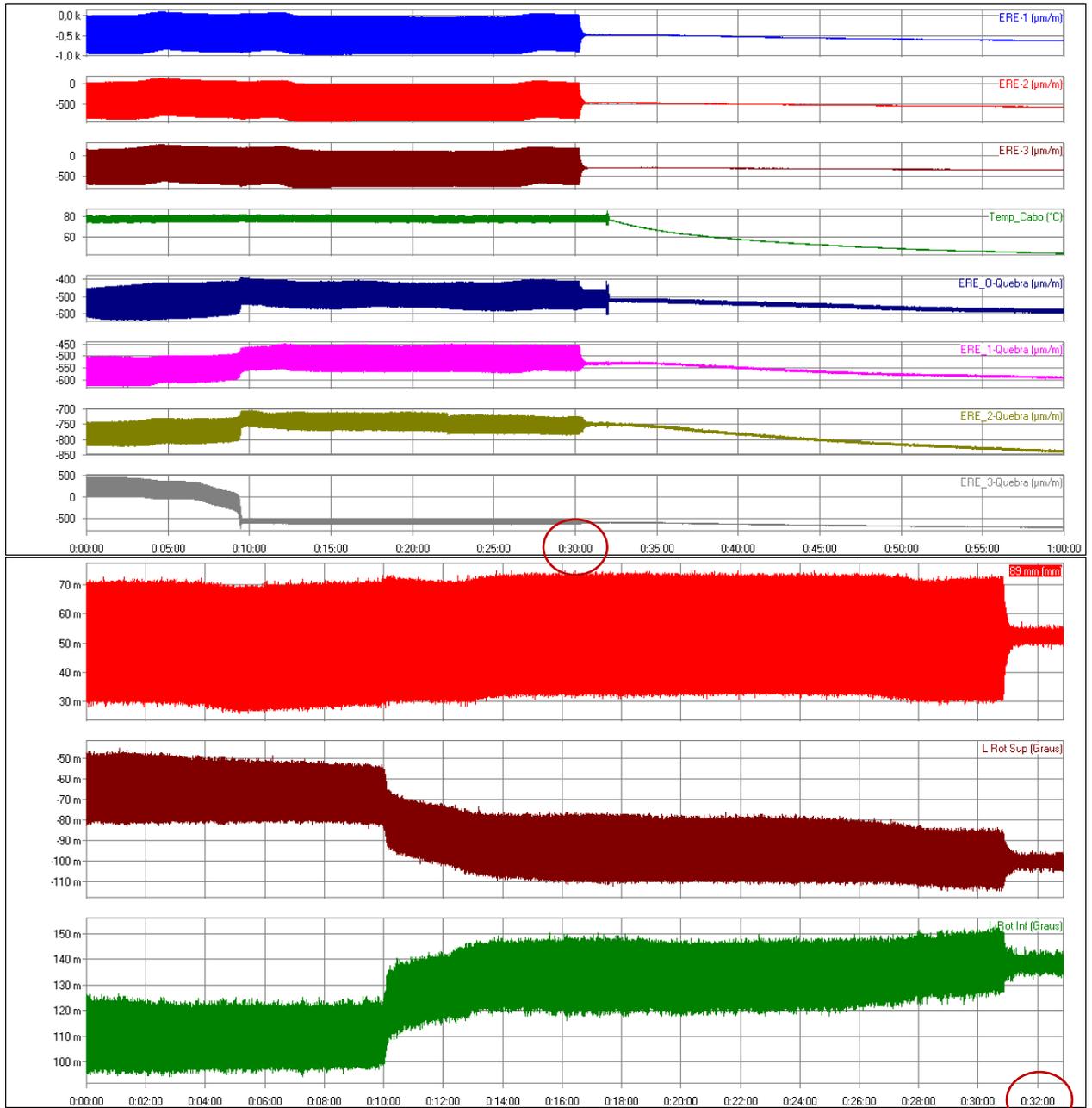


Figura E-7 – 05:35 Registro da quebra externa do fio 12, Pacote 37, intervalo da hora 37 a 38 horas de ensaio, sinais dos extensômetros e lasers. Em ambos os quadros de sinais o tempo de finalização foram iguais, conforme detalhes circulos.

APENDICE F

Resumos dos ensaios do grupo E1, para o estudo dos 14 ensaios, sendo sete realizado por (Badibanga, 2017) e sete separados da E1 para efeito comparativo, e foram inspecionados em temperatura Amb, e em 75°C o ensaio correspondente

ENSAIOS	Características dos fios que falharam nos ensaios														
	Externa	(E-C0-01) ^{T-QP}	T-E	(E-C0-02) ^{T-QP}	T-E	(E-C0-10) ^{B-V}	B-E	(E-C0-11) ^{B-L}	B-E	(E-C0-12) ^{B-QP}	(E-C1-03) ^{T-45}	(E-C1-07) ^{B-V}	(E-C1-08) ^{B-L}	B-I	
0,87 mm	EN-10_A1_1/3_75°C	Externa	(E-C0-01) ^{T-QP}	T-E	(E-C0-02) ^{T-QP}	T-E	(E-C0-10) ^{B-V}	B-E	(E-C0-11) ^{B-L}	B-E	(E-C0-12) ^{B-QP}	(E-C1-03) ^{T-45}	(E-C1-07) ^{B-V}	(E-C1-08) ^{B-L}	B-I
	EN-09_A1_3/3_75°C	Interna	(E-C1-01) ^{T-45}	T-I	(E-C1-02) ^{T-45}	T-I	(E-C1-06) ^{B-45}	B-I	(E-C1-07) ^{B-V}	B-E	(E-C0-12) ^{B-45}				
		Externa	(E-C0-09) ^{B-45}	B-E	(E-C0-10) ^{B-V}	B-E	(E-C0-11) ^{B-QP}	B-E	(E-C0-12) ^{B-45}	B-E					
	01_A1_1/3_Amb	Interna	(E-C1-06) ^{B-45}	B-I	(E-C1-07) ^{B-45}	B-I	(E-C1-08) ^{B-L}	B-I							
		Externa	(E-C0-09) ^{B-45}	B-E	(E-C0-10) ^{B-QP}	B-E	(E-C0-11) ^{B-V}	B-E	(E-C1-06) ^{B-QP}	B-I	(E-C1-07) ^{B-45}				
	02_A1_3/3_Amb	Externa	(E-C0-09) ^{B-QP}	B-E	(E-C0-10) ^{B-QP}	B-E	(E-C0-11) ^{B-V}	B-E							
		Interna	(E-C1-01) ^{T-45}	T-I	(E-C1-06) ^{B-QP}	B-I									
	0,91 mm	EN-07_A1_1/3_75°C	Externa	(E-C0-10) ^{B-QP}	B-E	(E-C0-11) ^{B-45}	B-E	(E-C0-12) ^{B-V}	B-E						
		EN-11_A1_2/3_75°C	Interna	(E-C1-12) ^{T-45}	T-I	(E-C1-01) ^{T-45}	T-I	(E-C1-06) ^{B-QP}	B-I	(E-C1-07) ^{B-45}	B-I				
			Externa	(E-C0-10) ^{B-QP}	B-E	(E-C0-11) ^{B-L}	B-E								
		EN-03_A1_3/3_75°C	Externa	(E-C0-01) ^{T-QP}	T-E	(E-C0-09) ^{B-L}	T-E	(E-C0-10) ^{B-45}	B-E	(E-C0-11) ^{B-V}	B-E				
			Interna	(E-C1-11) ^{T-L}	T-I	(E-C1-12) ^{T-45}	T-I	(E-C1-01) ^{T-45}	T-I	(E-C1-05) ^{B-V}	B-I	(E-C1-06) ^{B-L}	B-I	(E-C1-07) ^{B-V}	B-I
		01_A1_1/3_Amb	Externa	(E-C0-10) ^{B-45}	B-E	(E-C0-11) ^{B-QP}	B-E	(E-C0-12) ^{B-QP}	B-E						
			Interna	(E-C1-12) ^{T-45}	T-I	(E-C1-01) ^{T-45}	T-I	(E-C1-06) ^{B-45}	B-I						
02_A1_2/3_Amb		Externa	(E-C0-11) ^{B-V}	B-E	(E-C0-12) ^{B-QP}	B-E									
		Interna	(E-C1-01) ^{T-L}	T-I	(E-C1-06) ^{B-QP}	B-I									
03_A1_3/3_Amb		Externa	(E-C0-10) ^{B-QP}	B-E											
		Interna	(E-C1-01) ^{T-QP}	T-I	(E-C1-06) ^{B-QP}	B-I	(E-C1-07) ^{B-QP}	B-I							
1,01 mm		EN-04_A1_1/3_75°C	Externa	(E-C0-02) ^{T-V}	T-E	(E-C0-03) ^{T-45}	T-E	(E-C0-10) ^{B-QP}	B-E	(E-C0-11) ^{B-L}	B-E	(E-C0-12) ^{B-QP}	B-E		
		EN-06_A1_3/3_75°C	Interna	(E-C1-11) ^{T-45}	T-I	(E-C1-12) ^{T-45}	T-I	(E-C1-01) ^{T-45}	T-I	(E-C1-02) ^{T-45}	T-I	(E-C1-03) ^{T-45}	T-I	(E-C1-07) ^{B-V}	B-I
			Externa	(E-C0-01) ^{T-45}	T-E	(E-C0-02) ^{T-45}	T-E	(E-C0-10) ^{B-V}	B-E	(E-C0-11) ^{B-V}	B-E				
	01_A1_1/3_Amb	Interna	(E-C1-12) ^{T-45}	T-I	(E-C1-01) ^{T-45}	T-I	(E-C1-06) ^{B-45}	B-I	(E-C1-07) ^{B-QP}	B-I					
		Externa	(E-C0-11) ^{B-45}	B-E	(E-C0-12) ^{B-QP}	B-E									
	03_A1_3/3_Amb	Interna	(E-C1-01) ^{T-45}	T-I	(E-C1-06) ^{B-45}	B-I	(E-C1-07) ^{B-45}	T-I							
		Externa	(E-C0-11) ^{B-QP}	B-E											
	03_A1_3/3_Amb	Externa	(E-C0-11) ^{B-QP}	B-E											
		Interna	(E-C1-01) ^{T-45}	T-I	(E-C1-06) ^{B-45}	B-I	(E-C1-07) ^{B-45}	T-I							
	03_A1_3/3_Amb	Externa	(E-C0-11) ^{B-QP}	B-E											
		Interna	(E-C1-01) ^{T-45}	T-I	(E-C1-06) ^{B-45}	B-I	(E-C1-07) ^{B-45}	T-I							

Figura F-1– Resumo dos fios que falharam nas duas temperaturas

Comparação dos mapeamentos para os 7 ensaios em temperatura ambiente e 7 ensaios em temperatura de 75°C.

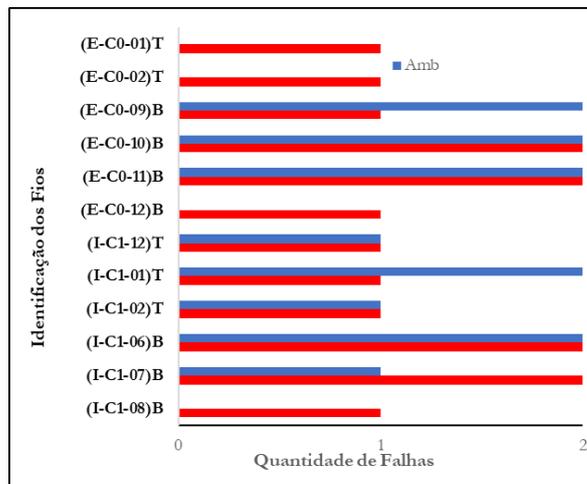
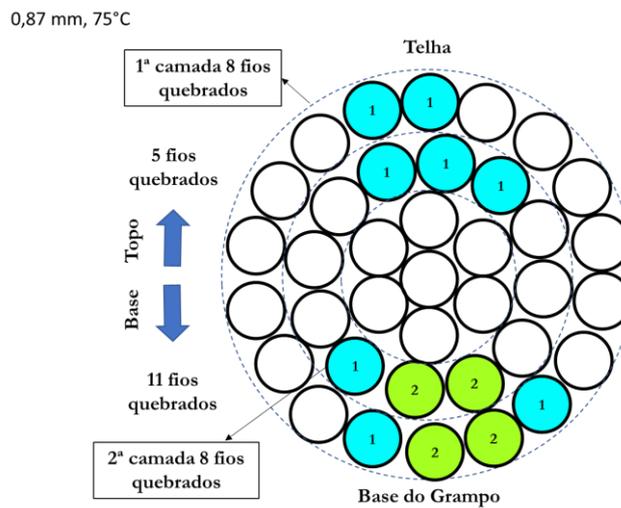
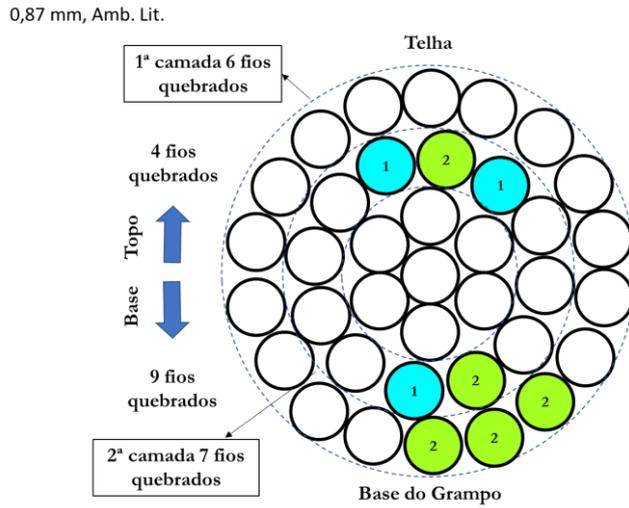


Figura F-2 – Comparação do mapeamento para a amplitude de 0,87mm

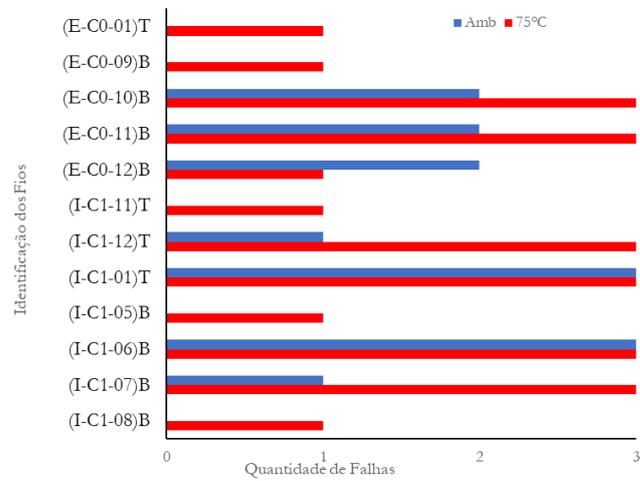
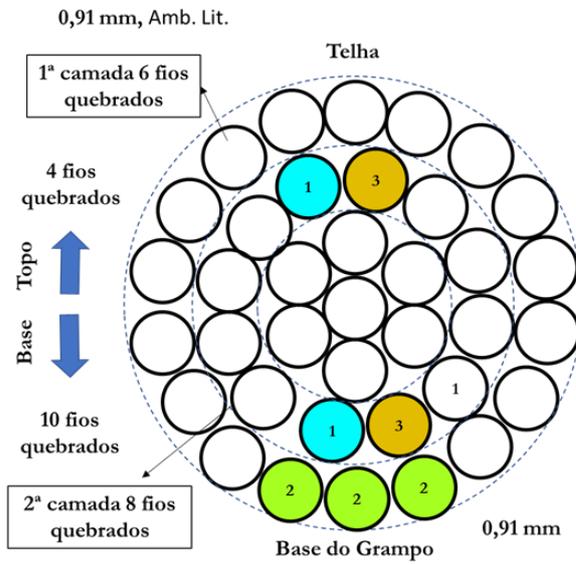
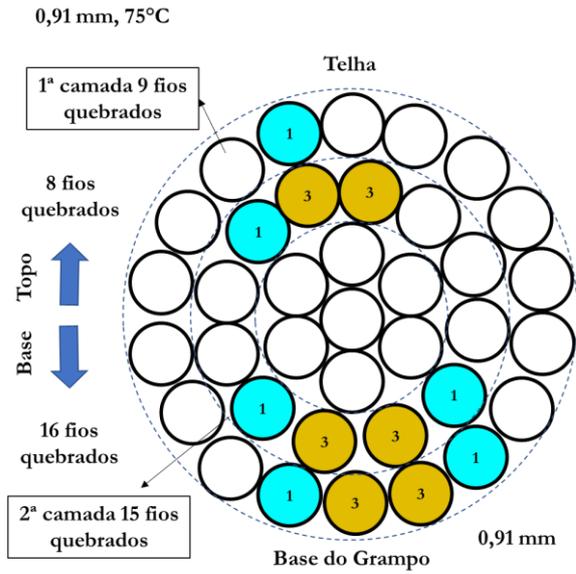
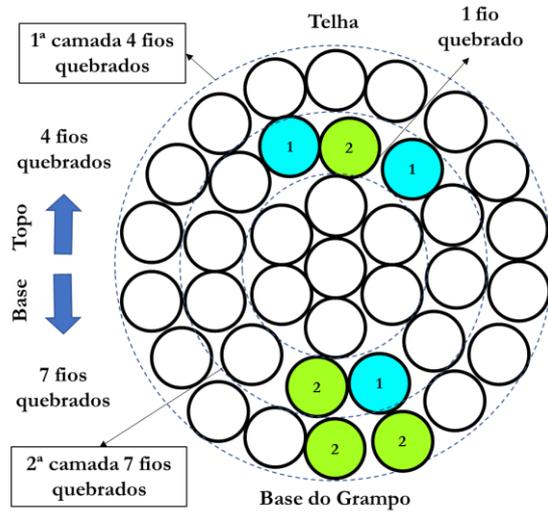


Figura F-3 - Comparação do mapeamento para a amplitude de 0,91mm

1,01 mm, Amb. Lit.



1,01 mm, 75°C

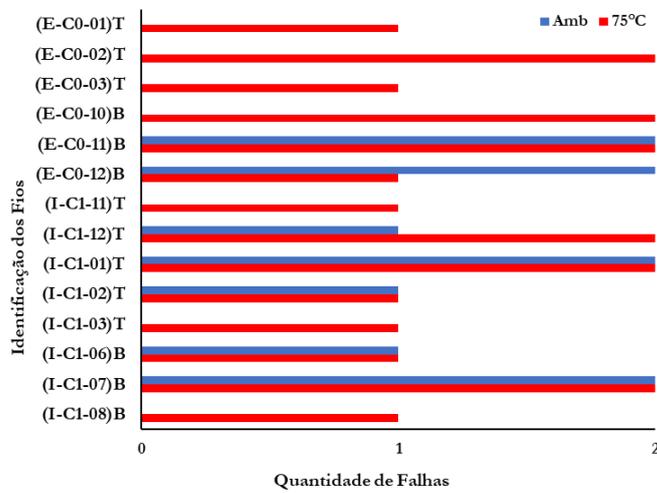
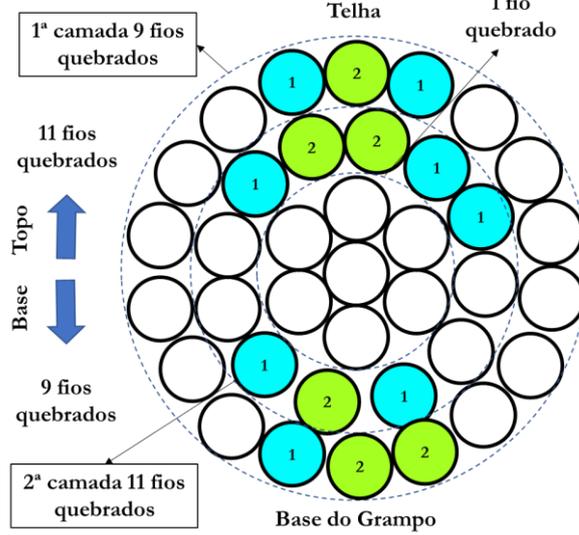


Figura F-4- Comparação do mapeamento para a amplitude de 1,01mm